О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко

Проектирование электрических машин

для вузов

издательство Высшая школа

ББК 34.42
Г63
УДК 621.313

Рецензенты:
кафедра электрических машин Томского политехнического института (заведующий кафедрой проф. Г. А. Сипайлов); проф. Д. Э. Брускин (Московский энергетический институт)

Гольдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С.
Г63 Проектирование электрических машин: Учебник для втузов/ Под ред. О. Д. Гольдберга. — М.: Высш. шк., 1984. — 431 с., ил.

В пер.: 1 р. 40 к.

В книге рассмотрены вопросы проектирования электрических машин общего назначения, особенности проектирования асинхронных двигателей, машин постоянного тока и синхронных машин мощностью до 1000 кВт (при 1500 об/мин); даны рекомендации по проектированию как серий электрических машин, так и отдельных машин; рассмотрены вопросы использования ЭВМ для расчета машин, а также расчетная оценка их надежности.

Г $\frac{2302030000-533}{001(01)-84}$ 113—84

ББК 31.261
6П2.1.081

ПРЕДИСЛОВИЕ

Поставленные XXVI съездом КПСС задачи ускорения научно-технического прогресса требуют всемерной автоматизации производственных процессов. Для этого необходимо создавать электрические машины, удовлетворяющие по своим показателям и характеристикам весьма разнообразным требованиям различных отраслей народного хозяйства.

Процесс создания электрических машин включает в себя проектирование, изготовление и испытание. В настоящем учебнике рассматриваются вопросы проектирования электрических машин.

Под *проектированием* электрической машины понимается расчет размеров отдельных ее частей, параметров обмоток, рабочих и других характеристик машины, конструирование машины в целом, а также ее отдельных деталей и сборочных единиц, оценка технико-экономических показателей спроектированной машины, включая показатели надежности.

Электротехнической промышленностью выпускается много разных видов электрических машин, и рассмотреть подробно методы проектирования всех этих машин в одной книге не представляется возможным. Поэтому в соответствии с программой курса «Проектирование электрических машин» в книге (в гл. 1—8) рассмотрены общие вопросы проектирования электрических машин общего назначения с моментом вращения 1—6500 Н·м, что примерно соответствует мощности (при 1500 об/мин) 0,12—1000 кВт, а затем в гл. 9—11 — методы проектирования наиболее распространенных и массово или серийно выпускаемых видов электрических машин: асинхронных, постоянного тока и синхронных. Вопросы проектирования трансформаторов, турбо- и гидрогенераторов изложены в учебных пособиях [1, 17, 36].

Для удобства пользования книгой в ней приведены справочные данные, необходимые для проектирования. Примеры расчета машин даны после каждого параграфа (гл. 9—11).

В настоящее время электрические машины проектируются в виде серий с обязательным использованием ЭВМ для расчетного исследования и автоматизированного оптимального проектирования. Однако студенту обычно задается при курсовом и дипломном проектировании рассчитать единичную электрическую машину или часть серии электрических машин. Это задание лучше выполнять

«вручную», так как при этом студент глубже усваивает особенности проектирования на всех этапах. ЭВМ следует применять в процессе проектирования для расчетного исследования. Повышению надежности электрических машин придается большое значение, ее нельзя рассматривать без применения методов расчетной оценки надежности. Такие методы изложены в гл. 6 и проиллюстрированы методикой и примером расчета в гл. 9. Прежде чем приступить к проектированию электрических машин, необходимо внимательно изучить стандарты, касающиеся параметров и размеров, а также условных обозначений машин (см. § 1-2).

Принята следующая терминология: неподвижная часть машины переменного тока называется *статором,* а вращающаяся — *ротором;* в машинах постоянного тока: неподвижная часть — *станина,* а вращающаяся — *якорь.* В основу обозначений параметров и размеров активных частей положена система, согласно которой обозначения состоят из латинских или греческих букв, и индексы — из строчных букв, главным образом русского и греческого алфавитов или арабских цифр. Параметры и размеры, относящиеся к неподвижной части машины, обозначаются индексом «1», а вращающейся — индексом «2». Размеры деталей, направленные вдоль оси вращения машины, обозначаются буквой l (длина), а поперек — буквами b (ширина) и h (высота).

Авторы выражают благодарность рецензентам д-ру техн. наук, проф. *Д. Э. Брускину,* сотрудникам кафедры «Электрические машины» Томского политехнического института и ее заведующему д-ру техн. наук, проф. *Г. А. Сипайлову* за ценные замечания и предложения.

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность д-ру техн. наук, проф. *Т. Г. Сорокеру,* д-ру техн. наук, проф. *В. И. Радину,* д-ру техн. наук, *Э. К. Стрельбицкому* и канд. техн. наук *Л. В. Мазия* за помощь при подготовке отдельных разделов книги.

Все замечания и пожелания направлять по адресу: *Москва К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».*

Авторы

Глава 1
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

§ 1-1. Основные направления в развитии электромашиностроения

Электромашиностроение прошло большой путь развития, начиная от простейших моделей, созданных полтора века тому назад на основе открытий *М. Фарадея* (1821—1831), до современных электродвигателей и генераторов.

Хотя на протяжении нескольких последних десятилетий принципы устройства электрических машин остались в основном теми же, однако коренным образом изменились их конструктивное оформление, рабочие характеристики и технико-экономические показатели. При этом почти все электромашиностроители перешли на проектирование и изготовление рядов или серий электрических машин.

Электропромышленность царской России представляла собой группу небольших предприятий, работавших по технической документации иностранных фирм. Только после Великой Октябрьской социалистической революции стало возможным развитие отечественного электромашиностроения. Планом ГОЭЛРО была поставлена перед советской электропромышленностью задача пройти за короткий исторический период путь, который зарубежная техника прошла в течение почти полувека.

Начиная с середины двадцатых годов советские электромашиностроители приступили к созданию новых отечественных конструкций, а также к разработке теоретических вопросов и проведению исследований, связанных с проектированием машин. К середине тридцатых годов был создан и внедрен в производство ряд серий асинхронных двигателей, синхронных машин и машин постоянного тока. Развившиеся и окрепшие к этому периоду электромашиностроительные заводы выпускали, однако, разные серии машин, с несовпадающими техническими данными, конструкцией и технико-экономическими показателями, что влекло за собой затруднения для потребителей в части замены, ремонта и создания резерва машин.

В связи с этим возникла необходимость создания единых серий машин, которые находились бы на современном техническом уровне и изготовлялись бы на различных заводах по единой технической документации, обеспечивая целесообразную специализацию производства на основе современной технологии. Первая единая серия была создана к началу пятидесятых годов в области наибо-

лее массовых машин — асинхронных двигателей мощностью от 0,6 до 100 кВт — серия А и АО. Затем единая серия была продлена для диапазона мощностей от 100 до 1000 кВт — серия А и АК. В области синхронных машин были разработаны генераторы мощностью от 12 до 75 кВт — серия ЕС, а также генераторы и двигатели мощностью от 100 до 800 кВт — серия СГ и СД. Единая серия П машин (двигателей и генераторов) постоянного тока мощностью от 0,3 до 200 кВт была создана в середине пятидесятых годов; затем серия была продлена для диапазона мощностей от 200 до 1400 кВт.

Опыт показывает, что изменение требований к электрическим машинам, появление улучшенных электротехнических материалов, усовершенствование конструкции и технологических процессов производства приводят к тому, что серии достаточно быстро устаревают и практически заменяются в производстве новыми через 10—20 лет (меньший срок относится к машинам с большим количественным выпуском — асинхронным двигателям мощностью до 100 кВт).

В настоящее время отечественной электропромышленностью изготовляются асинхронные двигатели мощностью от 0,12 до 400 кВт единой серии 4А и мощностью свыше 400 до 1000 кВт — серии А4, синхронные генераторы мощностью от 5 до 50 кВт серии ЕСС и мощностью от 125 до 800 кВт серии СГ2, синхронные двигатели мощностью от 132 до 1000 кВт серии СД2 и СДЗ2, машины постоянного тока мощностью от 0,37 до 1000 кВт серии 2П и частично машины постоянного тока мощностью от 0,12 до 200 кВт серии П (см. гл. 9—11).

Машины этих серий обладают высокими технико-экономическими показателями, находящимися на уровне современных серий ведущих зарубежных фирм. Новые серии разработаны с учетом международных норм-рекомендаций МЭК и СЭВ. В области асинхронных двигателей разработка серий проводилась всеми странами — членами СЭВ в соответствии с согласованными общими рекомендациями по унифицированной увязке установочных размеров со шкалой мощностей. Создание единых серий машин является ярким свидетельством преимуществ плановой социалистической экономики и единой технической политики не только в нашей стране, но и в масштабах содружества социалистических стран. Заканчивается разработка единой для всех стран — членов СЭВ серии АI асинхронных двигателей мощностью от 0,04 до 315 кВт, которая по своим габаритным, энергетическим и электромеханическим характеристикам, а также по уровню вибраций и шума будет соответствовать перспективному мировому уровню в области асинхронных двигателей.

Наибольший удельный вес в выпуске электрических машин занимают асинхронные двигатели, конструкция которых относительно простая, а трудоемкость изготовления малая. О масштабах применения и значении этих двигателей в народном хозяйстве страны можно судить по тому, что асинхронные двигатели мощ-

ностью от 0,12 до 400 кВт потребляют в СССР более 40% всей вырабатываемой электрической энергии.

Синхронные машины широко используют в качестве генераторов в передвижных и стационарных установках. В качестве двигателей они имеют ограниченное распространение при мощности свыше 100 кВт, хотя обладают преимуществами перед асинхронными в том, что могут работать как с коэффициентом мощности, равным единице, так и с опережающим, но стоимость их выше, а эксплуатация несколько сложнее.

В ряде областей народного хозяйства электропривод на постоянном токе значительно эффективнее по производительности и точности, чем на переменном токе, так как они могут обеспечивать необходимые по форме механические характеристики, плавное и экономичное регулирование частоты вращения в широких пределах, быстрые пуск и торможение, реверс и высокие кратковременные перегрузки. Роль этих двигателей в народном хозяйстве страны и их количественный выпуск становятся все более значительным вследствие расширяющегося внедрения автоматизированных производственных процессов, а также успехов в развитии тиристорного привода.

Основные тенденции в развитии электромашиностроения:

применение утоньшенной корпусной изоляции и обмоточных проводов с малой толщиной изоляции (главным образом эмальпроводов), обладающих необходимой механической и электрической прочностью. При этом повышается коэффициент заполнения обмоточного пространства медью и соответственно использование объема машины;

использование более нагревостойкой изоляции. В начале развития электромашиностроения применялась изоляция класса нагревостойкости A, затем — классов E и B, а в настоящее время наибольшее распространение находит изоляция класса F. В машинах, работающих в более тяжелых условиях, распространена изоляция класса нагревостойкости H;

применение улучшенных марок электротехнической стали. Широко используемые в настоящее время марки холоднокатаной электротехнической стали обладают большей магнитной проницаемостью и меньшими удельными потерями в сравнении с соответствующими марками горячекатаной стали;

усовершенствование охлаждения машин путем повышения производительности вентиляторов, уменьшения аэродинамического сопротивления воздухопровода, увеличения поверхности охлаждения отдельных обмоток и всей машины за счет оребрения корпуса (в закрытых машинах), а также усиления теплопередачи путем лучшего заполнения воздушных прослоек в обмотках пропитывающими лаками и компаундами;

усовершенствование методов расчета машин;

улучшение конструкции машин с придачей узлам и деталям

эстетических и рациональных форм, при обеспечении снижения их массы и повышения прочности.

Перечисленные направления содействуют понижению массы и габаритов машин. Например, за период с 1915 по 1982 г. масса асинхронных двигателей одинаковой мощности снизилась в среднем в три раза, а машин постоянного тока — в два с половиной раза.

Развитию технического уровня электрических машин сопутствуют и другие тенденции:

снижение динамического момента инерции за счет уменьшения объема двигателя, следовательно, и объема вращающейся части двигателя (ротора или якоря), а также путем увеличения отношения длины сердечника ротора или якоря к его диаметру;

повышение надежности машин, в частности за счет широкого распространения машин закрытого исполнения, в которых для улучшения охлаждения используют обдув наружной поверхности. Например, асинхронные двигатели мощностью до 15 кВт выпускаются в настоящее время только в закрытом исполнении с наружным обдувом (степень защиты IP44, способ охлаждения ICO141 — см. § 1-2). Значительно повышают надежность электрических машин применение конструкции изоляции с повышенной электрической и механической прочностью и ряд других мероприятий;

улучшение у двигателей постоянного тока регулировочных свойств как в части расширения диапазона регулирования частоты вращения вверх от номинальной изменением тока возбуждения, так и вниз от номинальной изменением напряжения на якоре. Улучшению регулирования частоты вращения вниз от номинальной без существенного уменьшения вращающего момента содействует применение независимой вентиляции;

улучшение условий работы двигателей постоянного тока, питаемых от статических преобразователей с относительно высокими значениями пульсации напряжения, при полностью шихтованной магнитной системе, включая станину.

Энергетические показатели машин (КПД и $\cos\varphi$) в основном сохраняются на одном уровне.

Особо следует отметить повышение технологичности конструкции, осуществляемой широкой унификацией узлов и деталей машин и придания им форм, содействующих возможности применения прогрессивных технологических процессов и усовершенствованного оборудования — автоматических линий, агрегатных станков, полуавтоматов, конвейеров и т. п.

Наблюдаемый в настоящее время переход к прямоугольным формам очертания машин нашел свое отражение в области отечественных асинхронных двигателей с высотой оси вращения $h \geqslant 280$ мм. Такая форма кроме эстетичности дает возможность осуществить блочную конструкцию машин с коробчатой станиной, при которой блоки механической и электрической частей изготовляют на отдельных технологических участках, и объединяют при сборке. При блочной конструкции обмотка сердечника статора и

процесс пропитки могут производиться вне станины. Соответственно облегчается ремонт обмотки.

Основным исполнением перечисленных единых серий электрических машин являются машины общего назначения. Под *машинами общего назначения* подразумеваются такие машины, которые могут применяться в различных отраслях народного хозяйства, в отличие от специальных машин, предназначенных для использования в определенных специфических условиях, например взрывозащищенных, крановометаллургических, тяговых и т. п.

На базе машин общего назначения проектируют и изготовляют без значительного изменения конструкции модификации машин, обладающие несколько измененными характеристиками, которые рассчитаны на удовлетворение требований отдельных видов электропривода. Например, у асинхронных двигателей модификациями могут быть *двигатели с повышенным скольжением, многоскоростные двигатели с переключением числа полюсов* и т. п.

§ 1-2. Стандартизация в области электрических машин

Значение стандартизации. Одна из важнейших задач народного хозяйства — улучшение качества продукции, неразрывно связанное с уровнем стандартизации. Основные технические требования к конструктивным исполнениям, размерам и параметрам, методам и средствам испытаний электрических машин, а также требования к материалам и полуфабрикатам, необходимым для производства машин, устанавливаются и определяются стандартами.

Большим резервом повышения экономической эффективности народного хозяйства является дальнейшее развитие внешних экономических отношений, расширение выпуска изделий, в том числе электрических машин на экспорт. В связи с этим все большее внимание уделяется согласованию на международной основе требований национальных стандартов. Международное сотрудничество в области стандартизации играет важную роль в устранении технических барьеров во внешней торговле и в установлении международных научно-технических связей в электромашиностроении.

К основным международным организациям в области стандартизации по электротехнике, участником которых является СССР, относятся Международная организация по стандартизации (ИСО) и Международная электротехническая комиссия (МЭК). Вопросами разработки рекомендаций занимаются технические комитеты, подкомитеты и создаваемые в них рабочие группы. Комитеты ИСО занимаются тематикой, охватывающей отдельные системы и даже отрасли, которые включают в себя также и вопросы электротехники, в то время как комитеты МЭК образованы главным образом для рассмотрения тех или иных видов электротехнического оборудования; в частности Комитет № 2 — вращающиеся электрические машины всех мощностей и размеров (за исключением тяговых электродвигателей).

Международные рекомендации разрабатывают по отдельным видам изделий и материалов, по терминологии, условным обозначениям, графическим изображениям и т. п. Рекомендации носят факультативный характер, т. е. их применение в национальной практике отдельных стран не обязательно. Однако в настоящее время практически все национальные стандарты по электрическим машинам создаются с учетом или непосредственно на базе рекомендаций ИСО и МЭК. Начиная с 1972 г. ИСО выпускает международные стандарты.

Особое значение имеет всестороннее расширение экономических и научно-технических связей СССР со странами — членами Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ). В комплексной программе дальнейшего углубления и совершенствования сотрудничества и развития социалистической экономической интеграции стран — членов СЭВ важное значение придается совместным работам в области стандартизации.

Работа по стандартизации в СЭВ планомерно ведется уже длительное время. Выпущен ряд рекомендаций СЭВ в области электрических машин, а в последние годы разрабатываются и выпускаются стандарты СЭВ, заменяющие национальные стандарты и обязательные для всех стран — членов СЭВ. Для усиления работы по унификации стандартов, действующих в отдельных странах — членах СЭВ, создана Постоянная комиссия СЭВ и Институт СЭВ по стандартизации.

При проектировании электрических машин должны учитываться требования стандартов СССР, а также рекомендации СЭВ, ИСО и МЭК. В следующих разделах рассматриваются стандартизованные виды исполнений и их обозначения, выходные параметры и размеры наружных частей (установочные и присоединительные размеры) электрических машин.

Номинальные режимы работы. Номинальные данные электрических машин должны соответствовать определенному режиму работы. ГОСТ 183—74 предусматривает режим работы с условными обозначениями S1—S8. Наиболее распространен продолжительный номинальный режим работы, который характеризуется продолжительностью работы машины, достаточной для достижения установившейся температуры всех частей электрической машины при неизменной внешней нагрузке — условное обозначение S1.

Номинальные мощности. Номинальные мощности электрических машин переменного и постоянного тока (двигателей и генераторов) регламентированы ГОСТ 12139—74, в котором учтены рекомендации СЭВ по стандартизации РС 189—70 и Публикации МЭК 72 в части номинальных мощностей. Согласно ГОСТ номинальные мощности должны соответствовать работе электрических машин при номинальных значениях напряжения, частоты вращения, частоты переменного тока, коэффициента мощности, а также при условиях и режимах работы, установленных соответствующими стандартами.

Стандартом предусмотрены следующие значения номинальных мощностей (в пределах от 0,12 до 1000 кВт): 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000 кВт. Эти значения мощностей обязательны для всех исполнений электрических машин по защите и по монтажу, а также для всех способов охлаждения. Для машин специализированного назначения (рольганговые, краново-металлургические и др.) указанные значения мощностей не обязательны.

Номинальные напряжения. Номинальные напряжения генераторов и двигателей до 1000 В регламентированы ГОСТ 21128—75, а свыше 1000 В — ГОСТ 721—77. В стандартах учтены рекомендации СЭВ РС 650—66 и Публикации МЭК 38(1975). Стандартом установлены наиболее широко применяемые номинальные напряжения (В):

Род тока	Переменный трехфазный	Постоянный
Генератор	230, 400, 690, 6300, 10500	115, 230, 460
Двигатель	220, 380, 660, 6000, 10000	110, 220, 440

Номинальные частоты вращения. Номинальные частоты вращения электрических машин регламентированы ГОСТ 10683—73; в стандарте учтены рекомендации СЭВ РС 780—66 и РС 655—66. Установлены следующие номинальные частоты вращения при частоте переменного тока 50 Гц для синхронных генераторов: 125; 150; 157,6; 214,3; 250; 300; 375; 428,6; 500; 600; 750; 1000; 1500; 3000 об/мин. Эта шкала используется также для синхронных и асинхронных двигателей с некоторыми изменениями.

Так, для синхронных двигателей дополнительно включены частоты вращения 100 и 166,6 об/мин, а исключена частота 428,6 об/мин; для асинхронных двигателей добавлены частоты вращения 120 и 166 об/мин, а исключены 214, 3 и 428, 6 об/мин. Номинальные частоты вращения асинхронных двигателей должны быть меньше перечисленных на частоту вращения, определяемую величиной номинального скольжения.

Для генераторов постоянного тока стандартом установлены в пределах до 3000 об/мин следующие номинальные частоты вращения: 400; 500; 600; 750; 1000; 1500; 2000; 3000, для двигателей: 25; 50; 75; 100; 125; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1000; 1500; 2000; 2200 и 3000 об/мин. Наименьшие частоты вращения двигателей (с регулированием числа оборотов изменением поля главных полюсов) и наибольшие частоты вращения двигателей (с регулированием числа оборотов изменением напряжения на якоре при номинальном напряжении и номинальной нагрузке на валу) должны соответствовать указанным номинальным частотам вращения двигателей.

Стандартом также установлены допускаемые отклонения номинальной частоты вращения двигателей и генераторов постоянного тока.

Степени защиты от внешних воздействий. Электрические машины могут иметь различные исполнения по защите от внешних воздействий, которые, с одной стороны, должны обеспечить защиту обслуживающего персонала от прикосновения к токоведущим или вращающимся частям, а с другой — защиту машины от попадания внутрь ее твердых посторонних тел и воды. Обозначения степени защиты регламентируются ГОСТ 14254—80, а применение — СТ СЭВ 247—76; в стандарте учтены требования рекомендаций Публикации МЭК 34—5.

Согласно указанному стандарту обозначение степеней защиты состоит из букв IP — начальные буквы английских слов International, Protection (международное обозначение степеней защиты) и следующих за ними цифр. Первая цифра характеризует степень защиты от прикосновения и от проникновения твердых тел в машину. Более распространенными являются следующие степени защиты по **первой характеристической цифре:**

2 — защита от возможности соприкосновения пальцев с токоведущими или движущимися частями внутри машины. Защита машины от попадания внутрь ее твердых посторонних тел диаметром более 12 мм;

4 — защита от соприкосновения инструмента, проволоки или других подобных предметов, толщина которых превышает 1 мм, с токоведущими или движущимися частями внутри машины*. Защита машины от попадания внутрь ее легких твердых посторонних тел диаметром более 1 мм.

Вторая цифра характеризует степень защиты машины от проникновения воды. Более распространенными являются следующие степени защиты по **второй характеристической цифре:**

2 — защита от капель воды. Капли воды, падающие под углом в пределах до 15° к вертикали, не должны оказывать на машину вредного действия;

3 — защита от дождя. Вода, падающая на машину в виде дождя под углом в пределах до 60° к вертикали, не должна оказывать на машину вредного действия;

4 — защита от брызг. Брызги воды любого направления, попадающие на машину, не должны оказывать на нее вредного действия.

Полный перечень степеней защиты, имеющих практическое значение, приведен в СТ СЭВ 247—76. Наибольшее применение находят следующие **степени защиты:**

IP22 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 12 мм и от капель воды (защищенная машина);

IP23 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 12 мм и от дождя (защищенная машина);

IP44 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 1 мм и от водяных брызг (закрытая машина).

* Если машина охлаждается внешним вентилятором, то вентилятор должен быть защищен от соприкосновения с ним пальцев как на стороне входа, так и на стороне выхода охлаждающего воздуха.

Способы охлаждения. Обозначения способов охлаждения регламентируются ГОСТ 20459—75, учитывающим рекомендации Публикации МЭК 34—6. Согласно этому стандарту обозначение способов охлаждения состоит из букв IC — начальные буквы английских слов International, Cooling (международное обозначение способов охлаждения) и следующей за ними характеристики цепей охлаждения. Последняя состоит из прописной буквы, условно обозначающей вид хладоагента и следующих за ней двух цифр; при охлаждении воздухом буква опускается. Первая цифра условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладоагента, вторая — способ его перемещения. Из указанных в стандарте более распространенными являются следующие условные обозначения цепей:

Условные обозначения устройства цепи (первая цифра):

0 — свободная циркуляция;

1 — охлаждение с помощью подводящей трубы;

3 — охлаждение с помощью подводящей и отводящей труб;

4 — охлаждение с помощью наружной поверхности машины;

5 — охлаждение с помощью встроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

6 — охлаждение с помощью пристроенного охладителя (с использованием окружающей среды).

Условные обозначения способа передвижения хладоагента (вторая цифра):

0 — свободная конвекция;

1 — самовентиляция;

3 — перемещение хладоагента с помощью пристроенного зависимого устройства;

5 — перемещение хладоагента с помощью встроенного независимого устройства;

6 — перемещение хладоагента с помощью пристроенного независимого устройства;

7 — перемещение хладоагента с помощью отдельного и независимого устройства.

Если машина имеет две или более цепей охлаждения, то в обозначении указывают характеристики всех цепей охлаждения, начиная с характеристики цепи со вторичным хладоагентом (с более низкой температурой). Чаще применяют следующие способы охлаждения, обозначения которых будут использованы в книге:

Способы охлаждения:

IC01 — защищенная машина с самовентиляцией; вентилятор расположен на валу машины;

IC0141 — закрытая машина, обдуваемая наружным вентилятором, расположенным на валу машины;

IC0641 — закрытая машина, обдуваемая наружным пристроенным вентилятором с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины;

IC0041 — закрытая машина с естественным охлаждением;

IC0151 — закрытая машина с охлаждением с помощью встроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

IC0161 — закрытая машина с охлаждением с помощью пристроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

IC13 — защищенная машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей трубы, осуществляемое пристроенным зависимым устройством;

IC17 — защищенная машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей трубы, осуществляемое отдельным и независимым устройством;

IC05 — то же, охлаждение с помощью встроенного вентилятора с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины;

IC06 — то же, охлаждение с помощью пристроенного двигателя-вентилятора, питаемого независимо от охлаждаемой машины;

IC37 — закрытая машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей и отводящей труб, осуществляемое отдельным и независимым устройством.

В дальнейшем изложении для машин с независимой вентиляцией будет приводиться ссылка только на способы охлаждения IC17 и IC37, поскольку все перечисленные способы независимой вентиляции практически равноценны по эффекту охлаждения.

Исполнения по способу монтажа. Формы исполнения по способу монтажа и их условные обозначения регламентируются СТ СЭВ 246—76, учитывающим рекомендации Публикации МЭК 34—7. Согласно стандарту обозначение формы исполнения по способу монтажа состоит из букв IM — начальные буквы английских слов International, Mounting (международное обозначение исполнений по способу монтажа) и следующих за ними цифр. Первая цифра обозначает группу конструктивного исполнения, например, цифра 1 — машину на лапах с одним или двумя подшипниковыми щитами; 2 — то же, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах); 3 — машину без лап с одним или двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите и т. д.

Вторая и третья цифры обозначают способ монтажа, например при группе конструктивного исполнения 1 цифры 00 — машину с горизонтально направленным концом вала и креплением к фундаменту лапами, 01 — с вертикально направленным концом вала вниз и креплением к стене лапами; при группе 3 цифры 01 соответствуют вертикально направленному концу вала вниз и креплению к фундаменту фланцем и т. д. Четвертая цифра обозначает исполнение вала, например цифра 1 — машину с одним цилиндрическим концом вала; 2 — то же, с двумя цилиндрическими концами вала и т. д.

Наиболее распространенными исполнениями по способу монтажа являются IM1001 — машина с двумя подшипниковыми щи-

тами на лапах, с одним горизонтально направленным цилиндрическим концом вала; IM1011 — то же, с вертикально направленным вниз одним цилиндрическим концом вала; IM3011 — машина с двумя подшипниковыми щитами без лап, с фланцем на одном подшипниковом щите, с вертикально направленным вниз одним цилиндрическим концом вала.

Полный перечень условных обозначений для возможных конструктивных исполнений машин по способу монтажа приведен в СТ СЭВ 246—76.

Климатические условия работы. Конструкция и исполнение машин должны предусматривать способность противостоять в условиях эксплуатации воздействию климатических факторов внешней среды. ГОСТ 15150—69 и 15543—70 регламентируют исполнение машин, категории их размещения, условия эксплуатации, хранения и транспортирования с учетом воздействия климатических факторов (температуры, влажности, пыли, солнечной радиации, интенсивности дождя и т. п.).

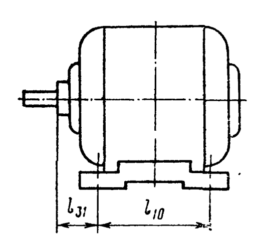
Каждому климатическому исполнению машин присвоено буквенное обозначение, например для районов с умеренным климатом — У, с холодным климатом — ХЛ и т. д.

Категория размещения машин имеет цифровое обозначение, например при наиболее благоприятных условиях, когда машина предназначена для установки в закрытых отапливаемых и вентилируемых производственных или других помещениях, категория размещения обозначается цифрой 4; категория размещения машины, предназначенной для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, обозначается цифрой 3.

Цифровое обозначение категории размещения следует за буквенным, характеризующим условия климата. Например, исполнение машины, предназначенной для районов с умеренным климатом при категории размещения 4, имеет условное буквенно-цифровое обозначение У4.

Установочные и присоединительные размеры. Высоты оси вращения h электрических машин с горизонтальной осью вращения, равные расстоянию от оси вращения до опорной плоскости машины, регламентированы ГОСТ 13267—73, который соответствует рекомендациям СЭВ по стандартизации РС 3030—71, Публикациям МЭК 72, МЭК 72А и ИСО Р496.

К каждому значению h привязаны определенные установочные и присоединительные размеры, регламентированные ГОСТ 18709—73 для $h=56\div400$ мм и ГОСТ 20839—75 для $h>400$ мм. Эти стандарты соответствуют рекомендациям СЭВ по стандартизации РС 3030—71; в стандартах также учтены рекомендации Публикаций МЭК 72, МЭК 72А и ИСО Р775. Стандартизованные значения h и связанные с ними установочно-присоединительные размеры (мм) приведены в табл. 1-1 для $h=56\div400$ мм и в табл. 1-2 для $h>400$ мм.



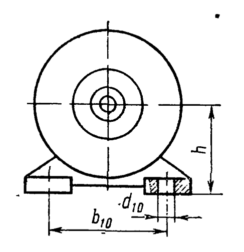


Таблица 1-1

h	b_{10}	l_{10}	l_{31}	d_{10}	h	b_{10}	l_{10}	l_{31}	d_{10}
56	90	71	36	5,8	200	318	228 267 305	133	19
63	100	80	40	7					
71	112	90	45	7	225	356	286 311 356	149	19
80	125	100	50	10					
90	140	100 125	56	10	250	406	311 349 406	168	24
100	160	112 140	63	12	280	457	368 419 457	190	24
112	190	114 140 159	70	12	315	508	406 457 508	216	28
132	216	140 178 203	89	12	355	610	500 560 630	254	28
160	254	178 210 254	108	15	400	686	560 630 710 800 900	280	35
180	279	203 241 279	121	15					

Таблица 1-2

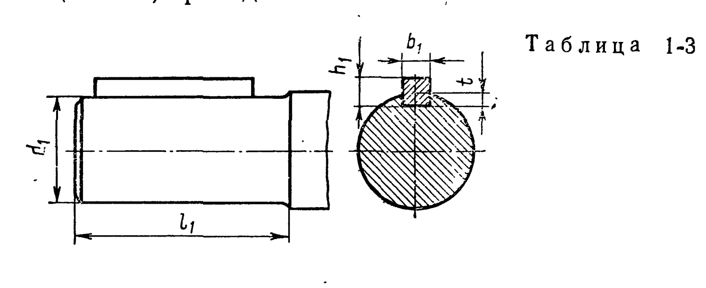
h	b_{10}	l_{10}	d_{10}
450	710; 800; 900; 1000; 1120;	355; 400; 450; 500; 560; 630; 710; 800; 900; 1000; 1120; 1250;	35
500	800; 900; 1000; 1120; 1250;	400; 450; 500; 560; 630; 710; 800; 900; 1000; 1120; 1250; 1400	42

Размер l_{31} (независимо от h) выбирают из следующего ряда: 0; 100; 200; 224; 250; 280; 315; 335; 355; 375; 400; 425; 450; 475; 500; 530; 560; 600; 630; 670; 710; 750; 800; 900; 1000 мм.

ГОСТ 18709—73 и 20839—75 регламентируют размеры выступающих цилиндрических концов валов.

Длина выступающего конца вала, размеры призматической шпонки и шпоночного паза, а также наибольший допускаемый момент вращения M, связанные с диаметром выступающего цилиндрического конца вала, приведены в табл. 1-3.

Таблица 1-3



d_1	l_1	b_1	h_1	t	M, Н·м	d_1	l_1	b_1	h_1	t	M, Н·м
мм						мм					
7	16	2	2	1,2	0,25	55	110	16	10	6	355
9	20	3	3	1,8	0,63	60	140	18	11	7	450
11	23	4	4	2,5	1,25	65	140	18	11	7	630
14	30	5	5	3	2,8	70	140	20	12	7,5	800
16	40	5	5	3	4,5	75	140	20	12	7,5	1000
18	40	6	6	3,5	7,1	80	170	22	14	9	1250
19	40	6	6	3,5	8,25	85	170	22	14	9	1600
22	50	6	6	3,5	14	90	170	25	14	9	1900
24	50	8	7	4	18	95	170	25	14	9	2360
28	60	8	7	4	31,5	100	210	28	16	10	2800
32	80	10	8	5	50	110	210	28	16	10	4000
38	80	10	8	5	90	120	210	32	18	11	5300
42	110	12	8	5	125	130	250	32	18	11	7400
48	110	14	9	5,5	200						

Примечания: 1. Наибольший допустимый момент вращения для $d_1 \leqslant 110$ мм указан по рекомендациям МЭК для электродвигателей переменного тока при продолжительном режиме работы (S1). 2. Значения l_1 в таблице соответствуют длинным выступающим концам валов в перечисленных выше стандартах.

Предельные отклонения на уставочные и присоединительные размеры регламентированы ГОСТ 13267—73 и 8592—71:

Высота h, мм	свыше 50 до 250	свыше 250 до 650
Предельные отклонения, мм	—0,5	—1,0

Допускаемые отклонения для рамеров b_{10} и l_{10} составляют $0,3z$, где z — диаметральный зазор, определяемый как разность между номинальными диаметрами отверстия d_{10} и крепежной детали.

Пределы отклонения размеров l_{31} не должны превышать следующих значений:

Номинальный диаметр вала d_1, мм	свыше 6 до 10	свыше 10 до 25	свыше 25 до 45	свыше 45 до 60	свыше 60 до 220
Предельные отклонения размера l_{31}, мм	$\pm 1,0$	$\pm 1,5$	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$	$\pm 4,0$

Предельные отклонения диаметров цилиндрических концов валов должны соответствовать следующим данным:

Номинальный диаметр вала d_1, мм	7 до 10	свыше 10 до 18	свыше 18 до 30	свыше 30 до 50	свыше 50 до 80	свыше 80 до 110
Предельные отклонения размера d_1, мм						
верхние	+0,007	+0,008	+0,009	+0,018	+0,030	+0,035
нижние	−0,002	−0,003	−0,004	+0,020	+0,011	+0,013

§ 1-3. Главные размеры

К *главным размерам электрических машин переменного тока* относят внутренний диаметр D_1 и длину l_1 сердечника статора; к *главным размерам машин постоянного тока* — наружный диаметр $D_{н2}$ и длину l_2 сердечника якоря. Указанные размеры называются *главными,* так как они определяют прочие размеры машин. От главных размеров зависят габариты, масса и другие технико-экономические показатели машин.

Определим связь главных размеров с частотой вращения, электромагнитными нагрузками (линейной нагрузкой и магнитной индукцией в воздушном зазоре), а также с другими параметрами машин. У машины переменного тока расчетная (внутренняя) мощность (В·А)

$$P'=m_1E_1I_1, \tag{1-1}$$

где m_1 — число фаз обмотки статора; E_1 — ЭДС фазы обмотки статора асинхронных двигателей, у синхронных машин $E_1=E_\delta$, т. е. ЭДС, индуктированной в фазе обмотки статора результирующим магнитным потоком воздушного зазора; I_1 — ток фазы обмотки статора.

Учитывая, что

$$E_1=4k_ф f_1 k_{об1} w_1 \Phi; \tag{1-2}$$

$$f_1=(pn_1)/60; \tag{1-3}$$

$$\Phi=\alpha'\tau l'_1 B_\delta 10^{-6}; \tag{1-4}$$

$$\tau=(\pi D_1)/(2p); \tag{1-5}$$

$$A_1=(20m_1w_1I_1)/(\pi D_1), \tag{1-6}$$

получим расчетную мощность (В·А)

$$P'=(D^2_1 l'_1 n_1 A_1 B_\delta \alpha' k_ф k_{об1})/(6,1\cdot 10^7). \tag{1-7}$$

Здесь $k_ф$ — коэффициент формы кривой поля, представляющий отношение действующего значения ЭДС к среднему; f — частота тока в сети, Гц; $k_{об1}$ — коэффициент обмотки статора основной гармонической кривой ЭДС; w_1 — число последовательно соединенных витков фазы обмотки статора; Φ — магнитный поток, Вб; p — число пар полюсов машины; n_1 — синхронная частота вращения, об/мин; α' — расчетное отношение среднего значения индукции в воздушном зазоре к ее максимальному значению; l_1' — расчетная длина сердечника статора, мм; B_δ — максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл; A_1 — линейная нагрузка обмотки статора, А/см; D_1 — диаметр, мм.

Зависимость (1-7) может быть представлена в виде

$$P'=D^2{}_1l'{}_1n_1/C_A. \qquad (1\text{-}8)$$

Здесь

$$C_A=D^2{}_1l'{}_1n_1/P'=6{,}1\cdot10^7/(A_1B_\delta\alpha'k_фk_{об1}) \qquad (1\text{-}9)$$

— *машинная постоянная Арнольда,* мм³. (об/мин)/(В·А).

Величину K_A, обратную машинной постоянной C_A, называют *коэффициентом использования* машины [В·А/(мм³·об/мин)]

$$K_A=P'/(D^2{}_1l'{}_1n_1)=A_1B_\delta\alpha'k_фk_{об1}/(6{,}1\cdot10^7). \qquad (1\text{-}10)$$

Величины C_A и K_A характеризуют уровень использования активных материалов, к которым относятся медь и алюминий обмоток, а также сталь магнитопровода машин.

Расчетная мощность (В·А) для двигателей переменного тока

$$P'=m_1E_1I_1=m_1k_нU_1I_1=k_нP_1=k_нP_2/(\eta\cos\varphi); \qquad (1\text{-}11)$$

для генераторов переменного тока

$$P'=m_1E_1I_1=m_1k_нU_1I_1=k_нP_2/\cos\varphi. \qquad (1\text{-}12)$$

Здесь U_1 — номинальное фазное напряжение, В; P_1 — подводимая мощность, В·А; P_2 — отдаваемая мощность, Вт; η и $\cos\varphi$ — КПД и коэффициент мощности при номинальной нагрузке, о. е.

Для асинхронных двигателей $k_н=E_1/U_1$, для синхронных машин $k_н=E_\delta/U_1$.

У асинхронных двигателей для удобства расчета принимаем значение магнитного потока основной гармоники индукции; соответственно коэффициент формы поля для синусоиды $k_ф=1{,}11$, а $\alpha'=2/\pi$, тогда (1-7), (1-9) и (1-10) примут следующий вид:

$$P'=D^2{}_1l'{}_1n_1A_1B_\delta k_{об1}/(8{,}62\cdot10^7); \qquad (1\text{-}13)$$

$$C_A=D^2{}_1l'{}_1n_1/P'=8{,}62\cdot10^7/(A_1B_\delta k_{об1}); \qquad (1\text{-}14)$$

$$K_A=P'(D^2{}_1l'{}_1n_1)=A_1B_\delta k_{об1}/(8{,}62\cdot10^7). \qquad (1\text{-}15)$$

Расчетная мощность (Вт) у машин постоянного тока

$$P'=E_2I_2, \qquad (1\text{-}16)$$

где E_2 и I_2 — ЭДС и ток якоря.

Учитывая, что

$$E_2=[2p/(2a)]nw_2\Phi/30, \quad (1\text{-}17)$$

$$\Phi=\alpha'\tau l'_2B_\delta\cdot 10^{-6}; \quad (1\text{-}18)$$

$$\tau=\pi D_{н2}/(2p); \quad (1\text{-}19)$$

$$A_2=20w_2I_2/(\pi D_{н2}\cdot 2a), \quad (1\text{-}20)$$

расчетная мощность

$$P'=D^2_{н2}l'_2nA_2B_\delta\alpha'/(6{,}1\cdot 10^7). \quad (1\text{-}21)$$

Здесь p — число пар полюсов; a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря; n — частота вращения при номинальной нагрузке, об/мин; w_2 — общее число витков обмотки якоря; Φ — магнитный поток в якоре, Вб; α'—расчетный коэффициент полюсной дуги, равный отношению расчетной полюсной дуги к полюсному делению; l'_2 — расчетная длина сердечника якоря, мм; $D_{н2}$— диаметр, мм; A_2 — линейная нагрузка обмотки якоря, А/см.

Зависимость (1-21) может быть представлена в виде

$$P'=D^2_{н2}l'_2n/C_A, \quad (1\text{-}22)$$

где

$$C_А=D^2_{н2}l'_2n/P'=6{,}1\cdot 10^7/(A_2B_\delta\alpha') \quad (1\text{-}23)$$

— машинная постоянная, мм³·(об/мин)/Вт;

$$K_А=P'/(D^2_{н2}l'_2n)=A_2B_\delta\alpha'/(6{,}1\cdot 10^7). \quad (1\text{-}24)$$

— коэффициент использования машины, Вт/(мм³·об/мин).

Расчетная мощность (Вт) для двигателей постоянного тока

$$P'=E_2I_2=k_нUIk_т=k_нk_тP_2/\eta; \quad (1\text{-}25)$$

для генераторов постоянного тока

$$P'=E_2I_2=k_нUk_тI=k_нk_тP_2. \quad (1\text{-}26)$$

Здесь U и I — напряжение (В) и ток (А) сети; $k_н=E_2/U$; $k_т=I_2/I$.

Отношение P'/n пропорционально расчетному вращающему моменту M'. Следовательно, машинная постоянная $C_А$ в (1-9), (1-14) и (1-23) пропорциональна объему сердечника, приходящемуся на единицу момента вращения, а коэффициент использования $K_А$ в (1-10), (1-15) и (1-24) — расчетному моменту вращения, приходящемуся на единицу объема сердечника. Чем меньше значения $C_А$ или чем больше значение $K_А$, тем меньше размеры сердечника статора или якоря и тем выше использование машины.

Значения $k_{об1}$ для машин переменного тока и α' для машин постоянного тока изменяются в достаточно узких пределах, поэтому при заданных мощности и частоте вращения объем сердечника машины зависит в основном от электромагнитных нагрузок. Чем больше A и B_δ, тем меньше главные размеры и выше использование активных материалов в машине. Однако увеличение электромагнитных нагрузок, сопровождаемое повышением температуры активных частей машины, ограничивается классом нагрево-

стойкости изоляции. При выборе электромагнитных нагрузок следует также учитывать, что отношение A/B_δ должно быть в определенных пределах, так как его значение влияет на технико-экономические показатели машин переменного тока — КПД, $\cos\varphi$, пусковые характеристики и массу, а в машинах постоянного тока — КПД, регулировочные свойства, коммутационные показатели и массу машины.

В гл. 9 и 11 для машин переменного тока и в гл. 10 для машин постоянного тока приведены рекомендуемые значения A и B_δ, базирующиеся на опыте современного электромашиностроения.

Одно и то же значение $D^2{}_1l_1$ для машин переменного тока или $D^2{}_{н2}l_2$ для машин постоянного тока может быть получено при разных значениях D и l, а следовательно, при разных отношениях $\lambda=l/D$. Отношение l/D влияет на массу, динамический момент инерции вращающейся части, энергетические и другие технико-экономические показатели машины.

Влияние это может быть различным и порой противоречивым, например, при увеличении λ, т. е. при уменьшении D и увеличении l падает динамический момент инерции, ускоряется процесс пуска и торможения двигателя и соответственно снижаются потери, возникающие при этом процессе. При увеличении λ уменьшаются масса лобовых частей обмоток и потери в них. Следовательно, у машин с большими значениями λ масса, приходящаяся на единицу мощности или момента вращения, снижается, а КПД растет.

Вместе с тем у вентилируемых машин с большими значениями λ ухудшаются условия охлаждения и может возникнуть необходимость в увеличении диаметра вала для обеспечения его достаточной жесткости и прочности. При достижении бóльших значений λ может возрасти трудоемкость изготовления, а следовательно, и себестоимость машины.

Выбор отношения l/D не является однозначной задачей; ее решению содействуют установленные практикой рациональные пределы максимальных значений λ_{max}. Эти значения приведены для асинхронных двигателей в табл. 9-6, для машин постоянного тока — на рис. 10-7, для синхронных машин — на рис. 11-10.

Так как ряд высот оси вращения h стандартизован, то проектирование производится двумя способами.

Способ первый. С применением (при выбранном h) максимального допускаемого диаметра сердечника $D_{н\,max}$, такая машина может не быть оптимальной по своим технико-экономическим показателям, но зато будет иметь предельно допускаемую мощность при выбранном h. В практике современного электромашиностроения наблюдается тенденция максимального снижения высоты оси вращения электродвигателей h при заданных мощности P_2, частоте вращения n. Основной причиной этого являются бóльшие удобства потребителей при соединении электродвигателей с приводимыми механизмами, имеющими меньшие габариты, чем электродвигатели, а также при встраивании электродвигателей в станки

и другие механизмы. Понижение высоты оси вращения уменьшает механическую инерционность роторов и якорей, а, следовательно, повышает динамические свойства двигателей. Указанная тенденция снижения h распространяется также на генераторы.

Учитывая, что снижение h при заданных значениях P_2 и n увеличивает длину машины, причем λ может выйти за допустимые рациональные пределы, следует при выбранной стандартной высоте оси вращения h проектировать машины с наибольшим допустимым наружным диаметром корпуса $D_{корп}$, обеспечивающим минимально допустимое расстояние h_1 от нижней части корпуса машины до опорной плоскости лап (рис. 1-1). Если при этом значение λ будет мало, следует переходить на ближайшую меньшую, а при высоких значениях λ—на ближайшую большую стандартную величину h. Этот способ проектирования не требует расчетных вариантов.

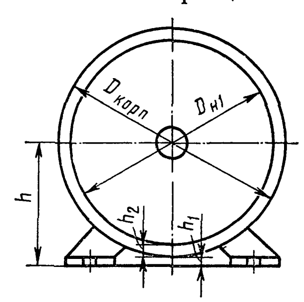


Рис. 1-1. К определению $D_{корп}$ и $D_{н1}$ машин переменного и постоянного тока с шихтованным сердечником статора

Способ второй. С применением (при выбранном h) диаметра сердечника $D_н$, обеспечивающим оптимальные технико-экономические показатели машины (см. гл. 7 и 8), такой способ проектирования требует расчета либо на ЭВМ, либо «ручного» расчета ряда вариантов с различными значениями $D_н$. При расчетах должно обеспечиваться условие $D_н \leqslant D_{н\,max}$. Расчеты показали, что разница в технико-экономических показателях оптимального варианта и машины с $D_{н\,max}$ относительно невелика. Поэтому в настоящей книге рассматривается как основной вариант расчета машин с $D_{н\,max}$.

Максимально допустимый наружный диаметр корпуса (мм)

$$D_{корп}=2(h-h_1). \qquad (1\text{-}27)$$

Для машин переменного тока, у которых сердечник статора заключен в литую станину, максимально допустимый наружный диаметр сердечника статора (мм)

$$D_{н1}=D_{корп}-2h_2=2(h-h_1-h_2), \qquad (1\text{-}28)$$

где h_2 — высота (толщина) стенки станины, мм [при радиальной системе вентиляции размер h_2 представляет собой сумму несколько уменьшенной высоты стенки станины и высоты ребра, к которому примыкает наружная поверхность сердечника (см. гл. 3)].

Для машин постоянного тока с монолитной станиной (рис. 1-2), являющейся частью магнитопровода, максимально допустимый наружный диаметр (мм)

$$D_{н1}=D_{корп}. \qquad (1\text{-}29)$$

При выполнении машин постоянного тока с шихтованной станиной наружный диаметр $D_{н1}$ определяют по (1-28). Значения h_1

и $h_2=f(h)$ приведены на рис. 1-3. Внутренний диаметр сердечника статора D_1 и наружный диаметр сердечника якоря $D_{н2}$ находятся в определенных соотношениях с $D_{н1}$, зависящих от числа главных полюсов машины $2p$ и диаметра $D_{н1}$. Усредненные зависимости $D_1=f(D_{н1})$ приведены в табл. 9-3 и § 11-3, а $D_{н2}=f(D_{н1})$ — на рис. 10-1.

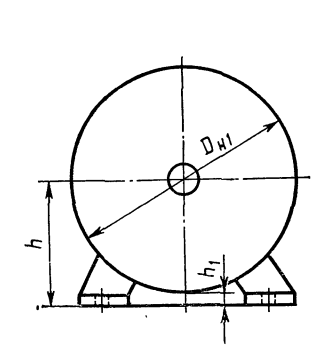


Рис. 1-2. К определению $D_{корп}$ и $D_{н1}$ машин постоянного тока с монолитной станиной

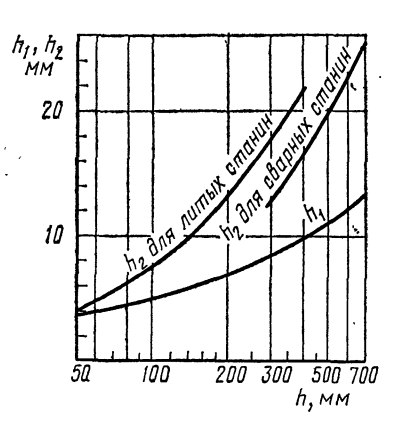


Рис. 1-3. Значения h_1 и $h_2=f(h)$

После выбора D_1 или $D_{н2}$ определяют из (1-13) расчетную длину сердечника статора асинхронного двигателя (мм)

$$l'_1=8{,}62\cdot 10^7 P'/(D^2_1 n_1 A_1 B_\delta k_{об1}), \quad (1\text{-}30)$$

из (1-7) расчетную длину сердечника синхронной машины (мм)

$$l'_1=6{,}1\cdot 10^7 P'/(D^2_1 n_1 A_1 B_\delta \alpha' k_ф k_{об1}), \quad (1\text{-}31)$$

а из (1-21) расчетную длину сердечника якоря машины постоянного тока (мм)

$$l'_2=6{,}1\cdot 10^7 P'/(D^2_{н2} n A_2 B_\delta \alpha'). \quad (1\text{-}32)$$

Конструктивную длину сердечника статора l_1 или сердечника якоря l_2 при отсутствии в сердечнике радиальных вентиляционных каналов принимают равными расчетным длинам l'_1 или l'_2. При наличии радиальных вентиляционных каналов

$$l_1=l'_1+n_{к1} l_{к1}; \quad (1\text{-}33)$$

$$l_2=l'_2+n_{к2} l_{к2}, \quad (1\text{-}34)$$

где $n_к$ и $l_к$ — число и длина (ширина) каналов.

§ 1-4. Геометрическое подобие машин

Параметры машин, входящих в ряд возрастающей мощности, изменяются в зависимости от мощности, подчиняясь определенным закономерностям [6]. Рассмотрим ряд геометрически подоб-

ных машин, т. е. машин, у которых все линейные размеры (диаметр, длина сердечника, высота и ширина пазов и т. п.) изменяются пропорционально. Примем магнитную индукцию B и плотность тока в обмотке J постоянными и не зависящими от мощности машины P, а площадь поперечного сечения магнитопровода S_c и общую площадь поперечного сечения проводников обмотки $S_{м\Sigma}$ возрастающими в квадрате с увеличением линейных размеров L. Известно, что

$$P \approx P' \equiv EI. \tag{1-35}$$

При постоянной частоте тока или при постоянной частоте вращения

$$E \equiv w\Phi \equiv wBS_c; \; I \equiv JS_м \equiv JS_{м\Sigma}/w, \tag{1-36}$$

где w — число витков обмотки; $S_м$ — площадь поперечного сечения проводника.

При подстановке (1-36) в (1-35) $P \equiv BJS_cS_{м\Sigma}$ и при постоянстве B и J—$P \equiv S_cS_{м\Sigma} \equiv L^4$ или $L \equiv P^{1/4}$.

Масса меди и стали пропорциональна их объему, следовательно, и масса машины $m \equiv L^3 \equiv P^{3/4}$. С достаточной точностью можно считать, что стоимость машины $C \equiv m$; отсюда $C \equiv L^3 \equiv P^{3/4}$. Из приведенных зависимостей следует, что масса и стоимость машины увеличиваются медленнее ее мощности. Приходящиеся на единицу мощности масса и стоимость машины $m/P \equiv C/P \equiv \equiv P^{3/4}/P \equiv P^{-1/4}$.

Магнитные и электрические потери при постоянстве B и J пропорциональны массе активных материалов. Принимая приближенно, что механические и вентиляционные потери пропорциональны массе машины, сумма потерь $P_\Sigma \equiv m \equiv L^3$ или $P_\Sigma \equiv P^{3/4}$. Следовательно, сумма потерь в машине увеличивается медленнее, чем ее мощность, а КПД машин при увеличении мощности растет; приходящаяся на единицу мощности сумма потерь $P_\Sigma/P \equiv \equiv P^{3/4}/P \equiv P^{-1/4}$. Поверхность охлаждения машин $S \equiv L^2$ или $S \equiv \equiv P^{1/2}$; приходящаяся на единицу поверхности охлаждения сумма потерь $P_\Sigma/S \equiv L^3/L^2 \equiv L \equiv P^{1/4}$. С увеличением мощности машины поверхность охлаждения растет медленнее потерь, следовательно, чем больше мощность машины, тем более интенсивны должны быть ее способы охлаждения. Если у машины малой мощности может применяться закрытое исполнение с естественным охлаждением, то для машин большой мощности требуются специальные вентиляционные устройства, усиливающие охлаждение машин.

Как показано в [37], таким же образом можно доказать, что динамический момент инерции $J_{и.д} \equiv P^{5/4}$, а $J_{и.д}/P \equiv P^{1/4}$; у асинхронных двигателей нагрев обмотки при пуске $t_п \equiv P^{1/2}$, скольжение $s \equiv P^{-1/4}$, относительный ток х. х. $I_0/I_н \equiv P^{-1/4}$, расход мощности на вентиляцию $P_в \equiv P^{5/4}$ и т. д.

В качестве примера рассмотрены изменение параметров асинхронного двигателя при увеличении мощности в пять раз. Для этого случая отнесенные к единице мощности масса, стоимость и

сумма потерь в машине уменьшатся в $\sqrt[4]{5}=1,5$ раза; скольжение и относительный ток х. х. также уменьшатся в полтора раза; сумма потерь, отнесенная к единице поверхности охлаждения, и динамический момент инерции, отнесенный к единице мощности, увеличатся в 1,5 раза; нагрев обмотки при пуске увеличится в $\sqrt{2}=1,41$ раза, расход мощности на вентиляцию увеличится в $\sqrt[4]{5^5}=7,45$ раза.

Однако на практике значения B и J в ряде машин не сохраняются постоянными и отклонения от идеальных законов подобия неизбежны, так как в машинах малой мощности возрастают падение напряжения, относительный ток х. х. и их можно выдержать в допустимых пределах только путем увеличения размеров, а в машинах большой мощности требуется, как было показано, повышение интенсивности охлаждения, что также нарушает закон подобия. Поэтому приведенные соотношения выдерживаются тем точнее, чем уже диапазон рассматриваемого ряда машин. Но хотя при расширении диапазона и неизбежны отклонения, знание общих закономерностей имеет практическое значение, так как дает возможность оценить тот или иной характерный параметр для всего ряда, если он известен только для одной машины.

§ 1-5. Особенности проектирования серий машин

Серия представляет собой ряд электрических машин со стройно нарастающими основными параметрами — мощностью и геометрическими размерами. Машины, входящие в серию, характеризуются общностью назначения и условий работы и имеют принципиальное подобие конструкции по всей серии или по ее участкам. Серия состоит из отдельных *типоразмеров,* под которыми понимаются электрические машины с определенными параметрами (мощность, частота вращения и т. п.) и монтажно-присоединительными размерами.

Чем меньше количественный выпуск машин, тем экономичнее увеличение в каждом наружном диаметре корпуса или станины количества длин корпусов. Практикой установлено, что применяют главным образом две длины корпуса на диаметр и только когда для данного диаметра получаются недопустимо длинные сердечники у машин второй длины, принимают одну длину, а при больших мощностях — три-четыре длины. При применении больше одной длины корпуса на диаметр закономерности подобия машин дополнительно нарушаются, однако в данном случае более важными являются технологические соображения: унифицируются узлы и детали и облегчаются условия производства.

В серии должны быть предусмотрены машины для всех необходимых частот вращения и напряжений. При проектировании серий задается шкала мощностей, значения которых должны соответствовать стандартному ряду. В серии также осуществляют не-

обходимые электрические и конструктивные модификации, выполняемые на базе машин основного исполнения.

У машин переменного тока данного типоразмера переход от одного числа полюсов к другому влияет на требуемую длину сердечника, однако корпуса, а следовательно, и другие элементы конструкции машин при разных числах полюсов следует унифицировать. Осуществлению такой унификации способствует то, что обычно имеющему место нарастанию длины сердечника при переходе от меньшего числа полюсов к большему сопутствует укорочение вылетов лобовых частей обмоток.

У машин постоянного тока каждый типоразмер выполняется с одной длиной сердечника, однако переход от одной частоты вращения к другой при самовентиляции также отражается на эффективности охлаждения, создавая известную перегрузку или недогрузку на разных частотах вращения. Поэтому выбираемая длина сердечника, а следовательно, и длина станины должны иметь такое значение, чтобы при частоте вращения соответствующей большей нагрузке, нагрев активных частей не превышал установленной нормы.

У машин переменного тока листы статора одного и того же типоразмера имеют одинаковый наружный диаметр при разных числах полюсов. Внутренние диаметры листов при $2p=2$, 4 и 6 обычно различные, однако при $2p\geqslant 8$ диаметры для соседних значений $2p$ целесообразно объединять, так как при этом уменьшается число различных штампов, а изменение магнитной индукции в спинке статора многополюсных машин за счет ее высоты незначительно.

При проектировании серий машин практикой установлены следующие этапы разработки после утверждения технического задания на серию: эскизный проект; технический проект; рабочий проект. Объем технической документации для каждого из этих проектов устанавливается в зависимости от сложности разрабатываемого объекта. Для примера ниже приводится обычно принимаемый объем технического проекта серии машин: 1. Электромагнитный, механический, тепловой и вентиляционный расчеты, расчета шума, вибрации и надежности. 2. Чертежи общих видов и главных узлов. 3. Материалы испытаний опытных образцов. 4. Предварительная калькуляция производства машин. 5. Основные положения по технологическому процессу производства. 6. Предварительные каталожные данные с техническими показателями машин. 7. Пояснительная записка с технико-экономическими обоснованиями проекта.

Материалы по п. п. 1—5 и 7 представляют для всех машин основного исполнения серии и типовых машин — модификаций серии.

Глава 2

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ

§ 2-1. Электроизоляционные материалы

Улучшение технико-экономических показателей проектируемых электрических машин в значительной степени определяется применением усовершенствованных материалов, в том числе электроизоляционных. Главные требования, предъявляемые к электроизоляционным материалам, — надлежащая нагревостойкость, электрическая и механическая прочность и как можно меньшая толщина.

Развитие электромашиностроения в течение последних десятилетий сопровождается повышением нагревостойкости используемых электроизоляционных материалов. Электрические машины с изоляцией класса нагревостойкости A в настоящее время практически не изготовляются, а класс E находит ограниченное применение в малых машинах. Конструкция электроизоляции современных электрических машин базируется главным образом на материалах классов нагревостойкости B и F. Специальные машины и машины, работающие в относительно тяжелых условиях (металлургия, шахты и т. п.), выполняют с электроизоляционными материалами класса нагревостойкости H.

По своему назначению электроизоляционные материалы подразделяют: на материалы, к которым предъявляют в первую очередь требования высокой электрической прочности, например материалы, изолирующие катушки обмоток; материалы, которые должны защищать основные электроизоляционные материалы от механических воздействий, например материалы для выкладки пазов. К таким материалам в первую очередь предъявляют требования высокой механической прочности.

В зависимости от их структуры электроизоляционные материалы подразделяют на следующие основные группы:

а) неорганические волокнистые материалы, основа которых — стекловолокно или асбест. Стекловолокнистые материалы обладают большой механической прочностью на разрыв, малой гигроскопичностью и высокой нагревостойкостью, класс которой определяется пропитывающими лаками. Недостатком стекловолокнистых материалов является их пониженная стойкость к изгибу и истиранию. Асбест используют в виде асбестовой бумаги, обладающей высокой нагревостойкостью, но имеющей низкую механическую прочность на разрыв;

б) слюдяные материалы, базирующиеся на щепаной или дробленой слюде, обладают высокими показателями по электрической и механической прочности, нагревостойкости, влагостойкости. Различают три основных вида слюдяных материалов — миканиты, слюдиниты и слюдопласты. Последние два вида материалов находят все большее распространение, вытесняя миканиты, для изготовления которых необходима дефицитная щепаная слюда;

в) пленочные и бумажные изоляционные материалы из синтетических смол, находящиеся в стадии развития и улучшения. Эти материалы обладают высокими нагревостойкостью, электрической и механической прочностью при малой толщине; они перспективны для применения в современных электрических машинах. К этой группе материалов относятся кроме указанных в табл. 2-1 также фенилоновая бумага и синтофолий классов нагревостойкости F и H, осваиваемые в настоящее время отечественной промышленностью;

г) вспомогательные материалы, используемые для механического крепления обмоток или отдельных сборочных единиц электрических машин.

Таблица 2-1

Группа	Наименование материала	Класс нагревостойкости
Неорганические волокнистые материалы	Стеклолакоткань	B, F, H
	Лента стеклянная	B, F, H
	Лента нетканая стекловолокнистая	B, F
	Бумага асбестовая	B, F
Слюдяные материалы	Микалента	B, F, H
	Миканит прокладочный	B, F, H
	Миканит формовочный	B, F, H
	Миканит коллекторный	B, F, H
	Лента стеклослюдинитовая	B, F
	Слюдопластофолий	B
	Лакотканеслюдопласт	B, F, H
Синтетические пленки и бумаги	Пленка полиамидная	F, H
	Пленкосинтокартон	B, F, H
	Пленкостеклопласт «Изофлекс»	B
	Пленкостеклопласт «Имидофлекс»	F, H
Вспомогательные материалы	Стеклотекстолит	B, F, H
	Электронит	B, F
	Бумага телефонная	B
	Пластмасса К6	B
	Пластмасса АГ4С	F

Марки перечислённых изоляционных материалов (в зависимости от класса нагревостойкости изоляции) приведены в приложениях 22—35 вместе с данными по конструкции изоляции обмоток электрических машин.

§ 2-2. Проводниковые материалы

Для обмоток электрических машин применяют в основном медные провода, изолированные стекловолокном или эмалью, а также неизолированные медные ленты и шины, дополнительно изолируемые при изготовлении обмоток.

Из проводов со стекловолокнистой изоляцией распространены круглые и прямоугольные провода марок ПСД и ПСДТ класса

нагревостойкости F, ПСДК и ПСДКТ класса нагревостойкости Н. Буква *Т* в конце обозначения марки провода указывает на утоньшенную изоляцию провода.

Из проводов с эмалевой изоляцией используют главным образом круглые провода марки ПЭТВ и прямоугольные марки ПЭТВП; нагревостойкость изоляции этих проводов соответствует классу В. Для обмоток электрических машин с изоляцией класса нагревостойкости F применяют круглые провода ПЭТ-155 и прямоугольные ПЭТП-155, а при классе нагревостойкости Н — круглые провода ПЭТ-200 и прямоугольные провода ПЭТП-200.

По сравнению с проводами, изолированными стекловолокном, эмалированные провода обладают рядом преимуществ — меньшей толщиной, большей теплопроводностью и влагостойкостью изоляции. Вместе с тем они имеют пониженную стойкость к тепловым ударам и к действию растворителей. Несмотря на указанные недостатки, эмалированные провода постепенно вытесняют провода со стекловолокнистой изоляцией.

Для выводов электрических машин при изоляции классов нагревостойкости В, F и Н применяют в основном кабель РКГМ по ГОСТ 16036—79, обладающий гибкостью, так как его жила состоит из тонких медных проволок, а изоляция эластична.

Для литой беличьей клетки короткозамкнутых роторов используют алюминий А5 по ГОСТ 11069—74 или алюминиевый сплав АКМ12-4 (в клетках роторов асинхронных двигателей с повышенным скольжением), для сварной — прямоугольные алюминиевые прессованные шины АДО по ГОСТ 15176—70.

Неизолированные медные провода (ленты и шины) применяют для обмоток возбуждения синхронных машин, обмоток добавочных полюсов и последовательных обмоток главных полюсов машин постоянного тока. Для демпферных обмоток синхронных машин используют медные круглые стержни.

Коллекторные пластины выполняют из холоднокатаной коллекторной меди по ГОСТ 3568—83, либо (у быстроходных машин) из кадмиевой коллекторной меди по ГОСТ 4134—75, которая обладает большей механической прочностью и меньшим износом на истирание.

§ 2-3. Электротехнические стали

Для листов сердечников электрических машин используют тонколистовую электротехническую сталь по ГОСТ 21427.0—75 — ГОСТ 21427.3—75. Указанные стандарты распространяются на горячекатаную и холоднокатаную сталь разных марок. Обозначение марок стали по ГОСТ 21427.0—75 состоит из четырех цифр, условно характеризующих основные свойства стали: первая — класс по структурному состоянию и виду прокатки (*1* — горячекатаная изотропная*, *2* — холоднокатаная изотропная, *3* — холоднокатаная

* Изотропная сталь обладает относительно малой разницей магнитной проводимости в направлении и поперек проката в отличие от анизотропной, имеющей резко отличающуюся магнитную проводимость в указанных направлениях.

анизотропная с ребровой текстурой); вторая — содержание кремния (0 — нелегированная, 1 — с содержанием кремния свыше 0,4 до 0,8% включительно, 2 — свыше 0,8 до 1,8% включительно, 3 — свыше 1,8 до 2,8% включительно, 4 — свыше 2,8 до 3,8% включительно, 5 — свыше 3,8 до 4,8% включительно); третья — по основной нормируемой характеристике (например, удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц, обозначаемые в стандарте $p_{1,5/50}$); четвертая — порядковый номер типа стали.

Раньше для сердечников, подвергающихся перемагничиванию (статор, ротор, якорь), применялась горячекатаная изотропная электротехническая сталь 1212 (Э12) *, 1312 (Э22) и 1412 (Э32) по ГОСТ 21427.3—75, поставляемая в виде листов стандартных размеров. За последние годы эта сталь вытесняется освоенной производством холоднокатаной изотропной электротехнической сталью по ГОСТ 21427.2—75, обладающей более высокой магнитной проницаемостью, пониженными удельными потерями при перемагничивании, малыми разнотолщинностью и разноплоскостностью в сравнении с горячекатаной сталью. При толщине листов 0,5 мм коэффициент заполнения сердечников, собираемых из холоднокатаной стали, повышается до 0,97. Холоднокатаная сталь поставляется также в рулонах и резаных лентах, что позволяет внедрять на электромашиностроительных заводах автоматический процесс штамповки.

Согласно ГОСТ 21427.2—75 рулонную сталь изготовляют шириной 500, 530, 600, 670, 750, 860 и 1000 мм. При относительно небольшом выпуске проектируемых машин выбор наружных диаметров сердечников статора машин переменного тока и якоря машин постоянного тока следует ориентировать на рулонную сталь стандартной ширины, учитывая при этом минимально допустимые припуски на штамповку.

Резаную ленту изготовляют шириной 90, 95, 107, 123, 138, 140, 150, 156, 160, 170, 175, 187, 200, 215, 226, 233, 250, 260, 280, 300, 322, 325, 360, 400, 445 и 500 мм, однако по соглашению потребителя с изготовителем допускается изготовлять ленту другой ширины. Поэтому при больших количествах выпускаемых машин целесообразно ориентироваться на применение резаных лент шириной, необходимой для обеспечения оптимальных показателей проектируемых машин.

Листы изготовляют следующих размеров: 500×1500, 750×1500, 1000×2000 мм.

Чем больше мощность электрической машины, тем выше отношение потерь в стали к сумме потерь в машине. Чтобы это отношение не превышало определенного, установленного практикой предела (обычно около 0,25), для машин большей мощности следует применять сталь с меньшими удельными потерями. Рекомендуемые марки стали в зависимости от величины машин приведены в гл. 9, 10 и 11; в этих рекомендациях предусматриваются стали

* В скобках указаны ранее применявшиеся обозначения марок стали по отмененному ГОСТ 802—51.

2013, 2312 и 2411. Кроме указанных марок стали ГОСТ 21427.2—75 предусмотрены стали 2011, 2012, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2412.

Холоднокатаная изотропная сталь для стабилизации магнитных свойств требует после проката термической обработки (отжига), осуществляемой на металлургических заводах. Стандартом предусмотрена также поставка указанной стали с термостойким электроизоляционным покрытием. Исключением является сталь 2013, которая поставляется без термической обработки, так как из-за высокой пластичности в отожженном состоянии при штамповке образуются большие заусенцы. Поэтому отштампованные листы из стали 2013 должны подвергаться термообработке на электромашиностроительном заводе в специальных печах в защитной атмосфере, а затем оксидированию в атмосфере водяного пара или воздуха для получения на поверхности листов изоляционного слоя.

Для шихтованных сердечников полюсов, не подверженных периодическому перемагничиванию, используют холоднокатаную анизотропную сталь 3411 по ГОСТ 21427.1—75. Согласно этому стандарту рулонную сталь изготовляют шириной 750, 860 и 1000 мм, резаную ленту — шириной 170, 180, 190, 200, 240, 250, 300, 325, 360, 400, 465 и 500 мм, однако по соглашению потребителя с изготовителем допускается другая ширина. Листы предусмотрены следующих размеров: 750×1500, 860×1500, 1000×2000 мм.

§ 2-4. Щетки. Конструкционные материалы

В обеспечении надежной работы элементов скользящего контакта электрических машин большую роль играют параметры щеток. Различают три основных группы щеток: графитные, изготовляемые из сажи, нефтяного и пекового кокса, графита (естественного); электрографитированные, изготовляемые аналогично графитным, но с дополнительным процессом обжига при высокой температуре (электрографитирование); металлографитные, в которых металлический порошок (в основном медный) смешан с графитом.

У перечисленных групп щеток к основным материалам добавляются связующие, которые придают пластичность мелкозернистому сырьевому материалу, в результате чего его можно прессовать в виде пластин; затем пластины прокаливают без доступа воздуха до спекания. Отдельные группы щеток обладают разными физическими свойствами. В ГОСТ 2332—75 приведены характеристики разных марок щеток, а в ГОСТ 12232.1—77 типы и размеры щеток.

Для контактных колец машин переменного тока используют главным образом металлографитные, а для коллекторов машин постоянного тока — графитные и электрографитированные щетки. Рекомендуемые марки и размеры щеток указаны в гл. 9—11.

Конструкционные материалы. Для литья станин машин переменного тока, подшипниковых щитов, нажимных шайб роторов и

якорей, а также других деталей, к которым не предъявляется требование высокой механической прочности, применяют серый чугун СЧ 12—28 и СЧ 15—32 по ГОСТ 1412—79. При повышенном требовании к механической прочности литых деталей может использоваться ковкий чугун КЧ 37—12 по ГОСТ 1215—79 или сталь 25Л и 35Л по ГОСТ 977—75.

Для изготовления валов и втулок применяют в основном прокатаную сталь 45 круглого поперечного сечения (ГОСТ 1050—74). Тонколистовой прокат (ГОСТ 16523—70) используют для защитных кожухов наружных вентиляторов, жалюзи, распорок между пакетами сердечников и нажимными шайбами ротора и якоря, деталей вентиляторов, направляющих воздух щитков и др. Толстолистовой прокат по ГОСТ 1577—70 идет для изготовления станин машин постоянного тока, толстолистовой прокат по ГОСТ 14637—79 — для станин и подшипниковых щитов машин переменного тока в сварном исполнении. Для станин машин постоянного тока с $h \leqslant 200$ мм применяют также цельнотянутые сварные трубы. Стальные поковки используют для коллекторных нажимных конусов и контактных колец фазных роторов.

Для уменьшения массы машин небольшой мощности используют для подшипниковых щитов, подшипниковых крышек, а также станин асинхронных двигателей алюминиевые сплавы Ал2 и Ал9 по ГОСТ 2685—75; при этом может быть осуществлен прогрессивный метод литья под давлением, значительно сокращающий затраты времени на механическую обработку указанных деталей.

Глава 3
КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

§ 3-1. Общие принципы конструирования

Конструирование начинается с разработки общих видов машины — продольного и поперечного. При конструировании учитываются требования к повышению надежности и экономичности в эксплуатации, к удобству в обслуживании, к снижению трудоемкости изготовления, к стоимости, к размерам и массе машин.

Трудоемкость изготовления машин определяется не только применяемым в производстве оборудованием, но и технологичностью конструкции. Для того чтобы конструкция деталей и узлов больше содействовала прогрессивным методам производства, конструкторы должны работать в непосредственном контакте с технологами. При наличии противоречивых требований к конструкции выносимое решение определяется с учетом технико-экономической эффективности вариантов конструкции.

Особенно важно соблюдение принципов технологичности конструкции для серийных машин, изготовляемых в массовых количествах. Серийное производство создает возможность как для широкой унификации деталей и узлов, так и для узкой специализа-

ции заводов по ограниченному количеству типоразмеров и исполнений машин, что делает целесообразным и рентабельным использование автоматического оборудования, агрегатных станков, конвейеров и т. п. Трудоемкость и стоимость производства в этих случаях значительно снижаются.

Разработку конструкции ведут с учетом требований стандартов. ГОСТы регламентируют основные выходные параметры машин, ассортимент и качество материалов и полуфабрикатов. Однако ГОСТами предусмотрен довольно обширный ассортимент материалов и полуфабрикатов, рассчитанный на удовлетворение потребностей всего народного хозяйства. Для электромашиностроительных предприятий целесообразно применение только небольшой части этого ассортимента, что содействует упрощению материально-технического снабжения, планирования и учета работы предприятий. Поэтому в электропромышленности создаются отраслевые стандарты, а на заводах — стандарты предприятия, которые регламентируют для предприятий сокращенную номенклатуру материалов, полуфабрикатов и деталей, учитывающую условия работы на данном заводе; это относится в первую очередь к крепежным деталям, проводам и кабелям, электротехнической стали, а также к посадкам и квалитетам отдельных сборочных единиц и деталей.

Оболочка машин (станина и подшипниковые щиты) имеет механическое назначение (за исключением машин постоянного тока, выполняемых с монолитной стальной станиной, которая одновременно является и частью магнитопровода). Оболочку машин выполняют главным образом из чугуна. В машинах меньшей мощности применяют также оболочку либо целиком из алюминиевых сплавов, либо, для повышения механической прочности, — смешанную конструкцию: алюминиевую станину и чугунные подшипниковые щиты; в машинах большей мощности — сварную стальную конструкцию оболочки. Достоинства и недостатки каждого из этих исполнений рассмотрены в § 3-10 и 3-11.

При проектировании следует учитывать, что основными исполнениями по степени защиты являются у машин переменного тока IP23 и IP44, а у машин постоянного тока — IP22 и IP44. В меньших машинах, где разница в эффективности охлаждения закрытого и защищенного исполнений меньше, чем в больших, степень защиты IP44 постепенно вытесняет IP23 и IP22, как повышающая надежность машин в эксплуатации. В области асинхронных двигателей мощностью до 18,5 кВт включительно (при $2p=4$) в СССР вообще исключено исполнение IP23 и оставлено только исполнение IP44 со способом охлаждения IC0141. Аналогичная тенденция наблюдается и в других странах.

Разработку конструкции машин переменного тока (кроме асинхронных двигателей с фазным ротором) по данным электромагнитного расчета обычно начинают со статора. После определения вылета лобовых соединений обмотки статора вычерчивают продольный разрез машины. Длину станины выбирают с учетом вы-

бранного способа закрепления сердечника статора в станине. Конструкция и длина подшипниковых щитов зависят от выбранной схемы вентиляции. Из построения продольного разреза определяются размеры вала, подлежащие проверке механическим расчетом.

Разработку конструкции машин постоянного тока целесообразно начинать с вращающейся части машины — якоря. После определения вылета лобовых частей и расположения коллектора в продольном разрезе устанавливают размеры вала, подлежащие проверке механическим расчетом. При аксиальной системе вентиляции должно быть дополнительно учтено размещение центробежного вентилятора. Затем разработке подвергают неподвижную часть машины — станину с полюсами и обмотками возбуждения.

Конструкцию асинхронных двигателей с фазным ротором разрабатывают, начиная с вращающейся части.

§ 3-2. Вал

Вал электрической машины служит либо для передачи вращающего момента электродвигателя к приводимому механизму, либо для передачи вращающего момента генератору от соединенного с ним первичного двигателя. Вал несет на себе массу вращающейся части машины и нагружен моментом вращения и изгибающим моментом передачи. Кроме того, вал испытывает воздействие одностороннего магнитного притяжения, возникающего при неравномерном воздушном зазоре.

Основные требования, предъявляемые к валу: жесткость в средней части, несущей сердечник ротора или якоря, с тем чтобы при работе машины прогиб вала не достигал недопустимых значений; прочность во всех его поперечных сечениях, достаточная для того, чтобы выдерживать без остаточных деформаций все нагрузки, возникающие при эксплуатации машины; превышение первой критической частоты вращения над рабочей не менее чем на 30%.

Соответствие вала проектируемой машины указанным требованиям проверяется механическим расчетом после построения продольного разреза машины.

Размеры вала определяют при разработке конструкции машины, начиная с диаметра d_1 и длины выступающего цилиндрического конца вала l_1, которые принимают в зависимости от момента вращения при номинальном режиме работы машины согласно табл 1-3 (все размеры в мм). Номинальный момент вращения (Н·м) двигателя

$$M_2=9{,}55P_2/n; \quad (3\text{-}1а)$$

генератора

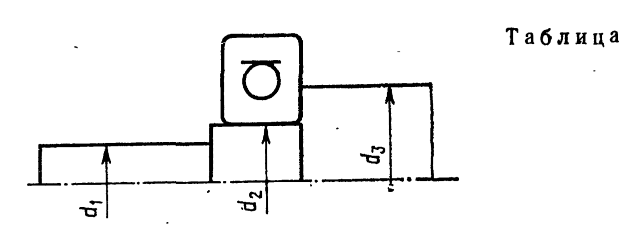
$$M_2=9{,}55\eta P_2/n, \quad (3\text{-}1б)$$

где P_2 — номинальная мощность, Вт; n — номинальная частота вращения, об/мин.

Для машин постоянного тока с $h \geqslant 355$ мм, работающих главным образом в относительно тяжелых условиях с большими перегрузками, применяют валы с конусной формой выступающего конца вала и размерами в соответствии с ГОСТ 12081—72.

Диаметр вала под подшипник d_2 и диаметр вала за подшипником d_3 принимают в зависимости от выбранного наружного диаметра выступающего конца вала d_1 согласно данным табл. 3-1.

Таблица 3-1



d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3
7	8	12	32	35	44	75	80	92
9	10	15	38	40	49	80	85	99
11	12	17	42	45	54	85	90	104
14	15	20	48	50	60	90	95	109
16	17	22	55	60	72	95	100	114
19	20	26	60	65	77	100	105	119
24	25	32	65	70	82	110	120	134
28	30	37	70	75	87	120	138	148

Валы диаметром в средней части до 100 мм изготовляют преимущественно из прокатанных цилиндрических прутков стали 45, но могут использоваться и другие марки; такие валы проектируют с минимальными возможными переходами от одной ступени к другой, чтобы уменьшить трудоемкость механической обработки и количество отходов. Для изготовления валов с бо́льшим диаметром применяют заготовки также из стали 45, получаемых методом ковки или прессовки.

На выступающем конце вала фрезеруют шпоночную канавку, ширину и глубину которой принимают по табл. 1-3. Шпоночные канавки фрезеруют также и на других участках вала — в месте расположения сердечника, вентилятора и коллектора (у машин постоянного тока). Для унификации на перечисленных участках вала целесообразно применять шпоночные канавки таких же размеров, как на выступающем конце вала. У асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при $h \leqslant 250$ мм сердечник ротора насаживают на вал с прессовой посадкой с нагревом без шпонки. У асинхронных двигателей с фазным ротором и у синхронных машин в валу просверливают центральное отверстие для размещения кабелей или шин, соединяющих обмотку с контактными кольцами.

§ 3-3. Механический расчет вала

Расчет вала на жесткость. Сила тяжести (Н) сердечника ротора с обмоткой и участком вала по длине сердечника асинхронного двигателя

$$G'_2 \approx 64 D^2_{н2} l_2 \cdot 10^{-6}; \quad (3\text{-}2)$$

синхронной машины

$$G'_2 \approx 61 D^2_{н2} l_2 \cdot 10^{-6}. \quad (3\text{-}3)$$

У машин постоянного тока определяют силу тяжести сердечника якоря с обмоткой и участком вала по длине сердечника с прибавлением силы тяжести коллектора, принимая ее приложенной к середине сердечника;

$$G'_2 \approx (64 D^2_{н2} l_2 + 60 D^2_к l_к) \times 10^{-6}. \quad (3\text{-}4)$$

Здесь l_2 — длина сердечника ротора или якоря без радиальных вентиляционных каналов, мм; $D_к$ и $l_к$ — наружный диаметр и длина коллектора, мм.

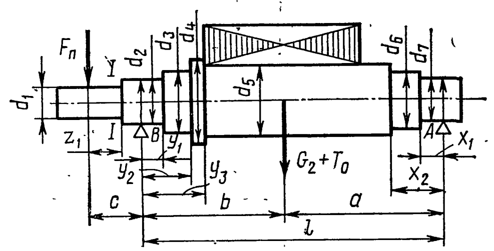


Рис. 3-1. Эскиз вала к механическому расчету

Для расчета прогиба вала составляют эскиз вала с размерами (рис. 3-1). Для этого должна быть разработана предварительно конструкция машины. Вал разбивают на три участка; a, b и c.

Под воздействием силы тяжести прогиб вала посередине сердечника (мм)

$$f_т = G'_2 (a^2 S_b + b^2 S_a) \cdot 10^6 / (3 E l^2), \quad (3\text{-}5)$$

где $E = 2{,}06 \cdot 10^{11}$ Па — модуль упругости стали; a, b и l — из рис. 3-1, мм.

Значения S_a и S_b определяют в соответствии с размерами d, x и y, указанными на рисунке и с расположением расчетных дан-

Таблица 3-2

Участок b								
d_i, мм	J_i, мм^4	y_i, мм	y^3_i, мм^3	$(y_i^3 - y_{i-1}^3)$, мм^3	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}$, мм$^{-1}$	y_i^2, мм^3	$(y_i^2 - y_{i-1}^2)$, мм^2	$\frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$, мм$^{-2}$
75	$155 \cdot 10^4$	45	$91 \cdot 10^3$	$91 \cdot 10^3$	0,059	$2{,}02 \cdot 10^3$	$2{,}02 \cdot 10^3$	0,00130
87	$281 \cdot 10^4$	125	$1953 \cdot 10^3$	$1862 \cdot 10^3$	0,663	$15{,}62 \cdot 10^3$	$13{,}6 \cdot 10^3$	0,00484
95	$397 \cdot 10^4$	165	$4492 \cdot 10^3$	$2539 \cdot 10^3$	0,639	$27{,}22 \cdot 10^3$	$11{,}6 \cdot 10^3$	0,00292
90	$322 \cdot 10^4$	330	$35937 \cdot 10^3$	$31445 \cdot 10^3$	0,766	$108{,}9 \cdot 10^3$	$81{,}7 \cdot 10^3$	0,02537
$S_0 = 11{,}128$						$S_0 = 0{,}03443$		

Продолжение табл. 3-2

Участок a					
d_i, мм	J_i, мм^4	x_i, мм	x^3_i, мм^3	$(x^3_i - x^3_{i-1})$, мм^3	$\frac{x^3_i - x^3_{i-1}}{J_i}$, мм$^{-1}$
75	$155\cdot10^4$	45	$91\cdot10^3$	$91\cdot10^3$	0,059
87	$281\cdot10^4$	125	$1953\cdot10^3$	$1862\cdot10^3$	0,663
—	—	—	—	—	—
90	$322\cdot10^4$	377	$50\,653\cdot10^3$	$48\,700\cdot10^3$	15,124

$S_a = 15,846$

ных по форме, указанной в табл. 3-2. В этой таблице d_i и J_i — диаметр и экваториальный момент инерции рассматриваемого участка вала, x_i и y_i — расстояния, соответствующие диаметру вала d_i.

Экваториальный момент инерции вала (мм^4)

$$J_i = \pi d^4_i/64. \qquad (3\text{-}6)$$

При работе машины возникает поперечная сила, вызываемая передачей через упругую муфту или клиноременной передачей и приложенная к выступающему концу вала. Эта сила от передачи (Н)

$$F_п = (k_п M_2/r)\cdot 10^3, \qquad (3\text{-}7)$$

где $k_п=0,3$ — при передаче упругой муфтой (учитывая неоднородную плотность втулок) и $k_п=1,8$ — при передаче клиновыми ремнями (размеры упругих муфт принимают по приложению 37, а клиноременных шкивов — по приложению 38), r — радиус окружности расположения пальцев упругой муфты или окружности шкива, мм.

От поперечной силы передачи прогиб вала посередине сердечника (мм)

$$f_п = F_п c\,[(1,5lS_0 - S_b)a + bS_a]\cdot 10^6/(3El^2), \qquad (3\text{-}8)$$

где $S_0 = \Sigma(y^2_i - y^2_{i-1})/J_i$ (рис. 3-1 и табл. 3-2).

Возникающий из-за неравномерности воздушного зазора, а также из-за прогиба вала под действием сил G'_2 и $F_п$, начальный расчетный эксцентриситет сердечника ротора или якоря (мм)

$$e_0 = k\delta + f_т + f_п, \qquad (3\text{-}9)$$

где $k=0,1$ при $\delta \geqslant 0,5$ мм, $k=0,15$ при $\delta < 0,5$ мм.

Эксцентриситет сердечника ротора или якоря вызывает неравенство магнитных потоков полюсов, а именно увеличение потоков в зоне меньших воздушных зазоров. При смещении сердечника на e_0 сила одностороннего магнитного притяжения (Н)

$$T_0 = 0,15 D_{н2} l_2 e_0/\delta; \qquad (3\text{-}10)$$

при $2p=2$ вместо 0,15 в (3-10) подставляют 0,1.

Дополнительный прогиб от силы T_0 (мм)

$$f_0=f_т T_0/G'_2. \qquad (3\text{-}11)$$

Увеличение прогиба на f_0 вызовет усиление силы магнитного притяжения, а следовтельно, и дальнейшее увеличение прогиба. Так будет продолжаться до тех пор, пока магнитное притяжение и жесткость вала не уравновесятся. Под действием сил магнитного притяжения установившийся прогиб вала (мм)

$$f_м=f_0/(1-f_0/e_0). \qquad (3\text{-}12)$$

Когда отдельные составляющие прогиба суммируются (в худшем случае), результирующий прогиб вала (мм)

$$f=f_т+f_п+f_м. \qquad (3\text{-}13)$$

Величина f должна составлять не более 10% от δ у асинхронных двигателей и не более 12% у машин постоянного тока и синхронных машин; при превышении этого значения увеличивают диаметр вала в средней части с повторением расчета.

Определение критической частоты вращения. Первая критическая частота вращения машины может рассматриваться в качестве характеристики изгибной жесткости вала.

Прогиб (мм) от силы тяжести упругой полумуфты

$$f_c=f_п F_c/(2F_п), \qquad (3\text{-}14)$$

шкива

$$f_c=f_п F_c/F_п, \qquad (3\text{-}15)$$

где $F_c=9{,}81m/2$ — сила тяжести соединительного устройства (упругой полумуфты или шкива); m — масса упругой муфты или шкива (см. приложения 37 и 38), кг.

С учетом влияния силы тяжести соединительного устройства первая критическая частота вращения (об/мин)

$$n_{кр}\approx 950\sqrt{(1-f_0/e_0)/(f_т+f_c)}. \qquad (3\text{-}16)$$

Значения $n_{кр}$ должно превышать максимальную рабочую частоту вращения не менее чем на 30%.

Расчет вала на прочность. Расчет ведется, исходя из теории максимальных касательных напряжений. Вал рассчитывают на участке c в наиболее нагруженном сечении $1-1$ выступающего конца вала; в расчете прочности момент сопротивления определяют по диаметру выступающего конца вала, уменьшенному на высоту шпоночной канавки. На участке a напряжения будут ниже вследствие унификации диаметров вала под подшипниками. В рассматриваемом сечении вала на участке c изгибающий момент (Н·м)

$$M_{и(c)}=k(F_п+F_c)z_1\cdot 10^{-3}, \qquad (3\text{-}17)$$

где $k=2$ — принимаемый коэффициент перегрузки.

При соединении машины упругой муфтой отрезки z_1 и c отсчитывают от середины втулки муфты. В этом случае (см. приложение 37)

$$z_1 \approx L/2+l_1/2. \qquad (3\text{-}18)$$

Соответственно определяют и другие размеры на участке c. При соединении машины шкивом z_1 и c отсчитывают от середины длины выступающего конца вала.

Момент кручения (Н·м)

$$M_к = kM_2; \qquad (3\text{-}19)$$

момент сопротивления при изгибе (мм³)

$$w = 0{,}1d^3_i. \qquad (3\text{-}20)$$

При совместном действии изгиба и кручения приведенное напряжение (Па)

$$\sigma_{пр} = (\sqrt{M^2_и + M^2_к}\cdot 10^9)/w. \qquad (3\text{-}21)$$

Значение $\sigma_{пр}$ ни в одном сечении вала не должно превышать $0{,}7\sigma_т$, где $\sigma_т$ — предел текучести качественной стали на растяжение:

Марка стали	30	35	40	45	50
$\sigma_т$, Па	$230\cdot10^6$	$270\cdot10^5$	$310\cdot10^6$	$350\cdot10^5$	$390\cdot10^5$

Пример расчета вала. Вал асинхронного двигателя (100 кВт, 1470 об/мин), соединенный с приводимым механизмом упругой муфтой: $D_{н2}=288$ мм; $l_2=330$ мм; $\delta=1$ мм; муфта — тип МУВП 1—70 (см. приложение 37); $m=38{,}5$ кг; $L=288$ мм; $r=95$ мм. Размеры вала (см. рис. 3-1) мм: $d_1=70$; $d_2=75$; $d_3=87$; $d_4=95$; $d_5=90$; $d_6=87$; $d_7=75$; $c=120$; $y_1=45$; $y_2=125$; $y_3=165$; $b=330$; $a=370$; $l=700$; $x_1=45$; $x_2=125$; $t=7{,}5$ (см. табл. 1-3); сталь 45.

Определение S_a, S_b и S_0 по табл. 3-2.

Параметр	Источник	Расчет
G'_2, Н	(3-2)	$64\cdot288^2\cdot330\cdot10^{-6} = 1752$
$f_т$, мм	(3-5)	$1752(370^2\cdot11{,}128 + 330^2\cdot15{,}846)10^6/(3\cdot2{,}06\cdot10^{11}\cdot700^2) = 0{,}0188$
M_2, Н·м	(3-1)	$9{,}55\cdot100\cdot10^3/1470 = 650$
$F_п$, Н	(3-7)	$(0{,}3\cdot650/95)10^3 = 2053$
$f_п$, мм	(3-8)	$2053\cdot120\,[(1{,}5\cdot700\cdot0{,}03443-11{,}128)\cdot370 + 330\cdot15{,}846]\times10^6/(3\cdot2{,}06\cdot10^{11}\cdot700^2) = 0{,}0118$
e_0, мм	(3-9)	$0{,}1\cdot1 + 0{,}0188 + 0{,}0118 = 0{,}1306$
T_0, Н	(3-10)	$0{,}15\cdot288\cdot300\cdot0{,}1306/1 = 1692$
f_0, мм	(3-11)	$0{,}0188\cdot1692/1752 = 0{,}0182$

Параметр	Источник	Расчет
$f_м$, мм	(3-12)	$0,0182/(1-0,0182/0,1306)=0,0211$
f, мм	(3-13)	$0,0188+0,0118+0,0211=0,0517$ (менее допустимого значения $=0,1\cdot 1=0,1$ мм)
f_c, мм	(3-14)	$0,0118\cdot 9,81\cdot 38,5/(2\cdot 2053)=0,0011$
$n_{кр}$, об/мин	(3-16)	$950\sqrt{(1-0,0182/0,1306)/(0,0188+0,0011)}=6248$ (больше минимально допустимого значения $n_{кр}=1,3\times$ $\times 1470=1911$ об/мин)
z_1, мм	(3-18)	$288/2+58/2=173$
$M_{в(c)}$, Н·м	(3-17)	$2(2053+9,81\cdot 38,5/2)173\cdot 10^{-3}=776$
$M_к$, Н·м	(3-19)	$2\cdot 650=1300$
w, мм³	(3-20)	$0,1(70-7,5)^3=24\,414$
$\sigma_{пр}$, Па	(3-21)	$(\sqrt{776^2+1300^2}\cdot 10^9)/24\,414\approx 62\cdot 10^6$ (меньше максимально допустимого для стали марки 45 значения $\sigma_т=$ $=0,7\cdot 350\cdot 10^6=245\cdot 10^6$ Па)

§ 3-4. Сердечник и обмотка ротора

Штамповка листов ротора асинхронных двигателей производится из высечки листов статора. На листах ротора создают изолирующую оксидную пленку путем термической обработки отдельных штампованных листов у двигателей с $h\leqslant 250$ мм или собранного сердечника у двигателей с $h>250$ мм.

Сердечник короткозамкнутого ротора двигателей с $h\geqslant 160$ мм набирают из отштампованных листов на центрирующую оправку по специальному знаку, прессуют и без снятия давления закрепляют на оправке, после чего сердечник поступает на заливку алюминием. Сердечник ротора двигателей с $h\leqslant 132$ мм сваривают на полуавтоматах внутренним швом, затем их заливают алюминием без применения специальной оправки. После заливки сердечники роторов двигателей с $h\leqslant 250$ мм насаживают на вал без шпонки в нагретом состоянии (рис. 3-2), а у двигателей с $h>250$ мм — на вал со шпонкой при прессовой посадке (рис. 3-3).

Короткозамкнутые роторы асинхронных двигателей с $h\geqslant 400$ мм выполняют со сварной алюминиевой клеткой. С листов роторов снимают заусенцы, затем покрывают изолирующим лаком, после чего листы набирают непосредственно на вал. Собранный сердечник, размещенный между нажимными шайбами, прессуется и закрепляется с одной стороны упорным заплечиком вала, с другой — кольцевой шпонкой.

Сердечники фазных роторов выполняют таким же образом, как и у короткозамкнутых роторов со сварной клеткой; при этом нажимные шайбы ротора имеют приливы, являющиеся обмоткодержателями, на которые опираются лобовые части обмотки (рис. 3-4).

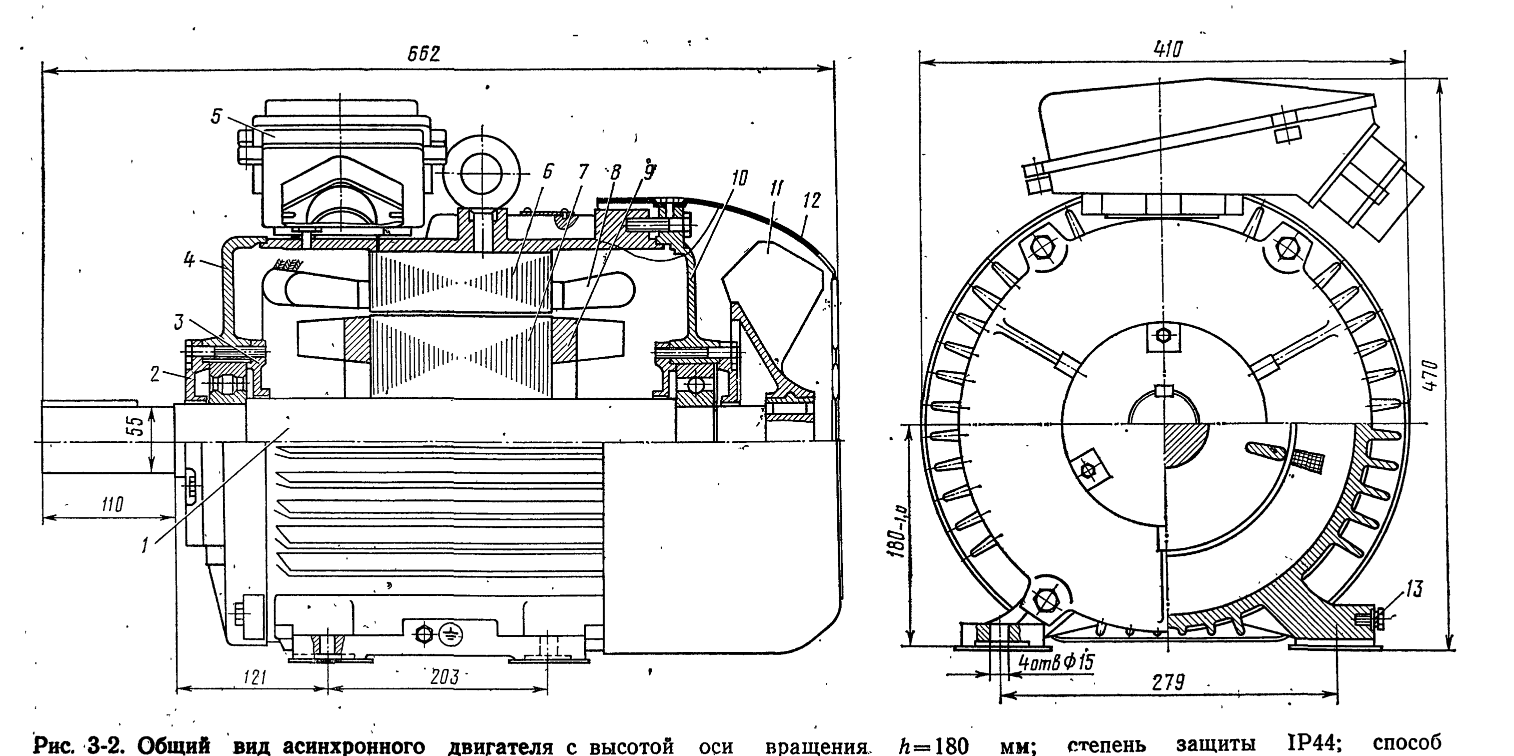


Рис. 3-2. Общий вид асинхронного двигателя с высотой оси вращения $h=180$ мм; степень защиты IP44; способ охлаждения IC0141; 22 кВт, 220/380 В; $2p=4$; ротор короткозамкнутый:

***1* — вал; *2* — крышка подшипниковая наружная; *3* — крышка** подшипниковая внутренняя; ***4* — щит подшипниковый; *5* — коробка** выводов; ***6* —** сердечник статора; ***7* — сердечник** ротора; *8* — обмотка статора; *9* — обмотка ротора; *10*—щит подшипниковый; *11*—вентилятор; *12*—кожух вентилятора; ***13* — болт заземления**

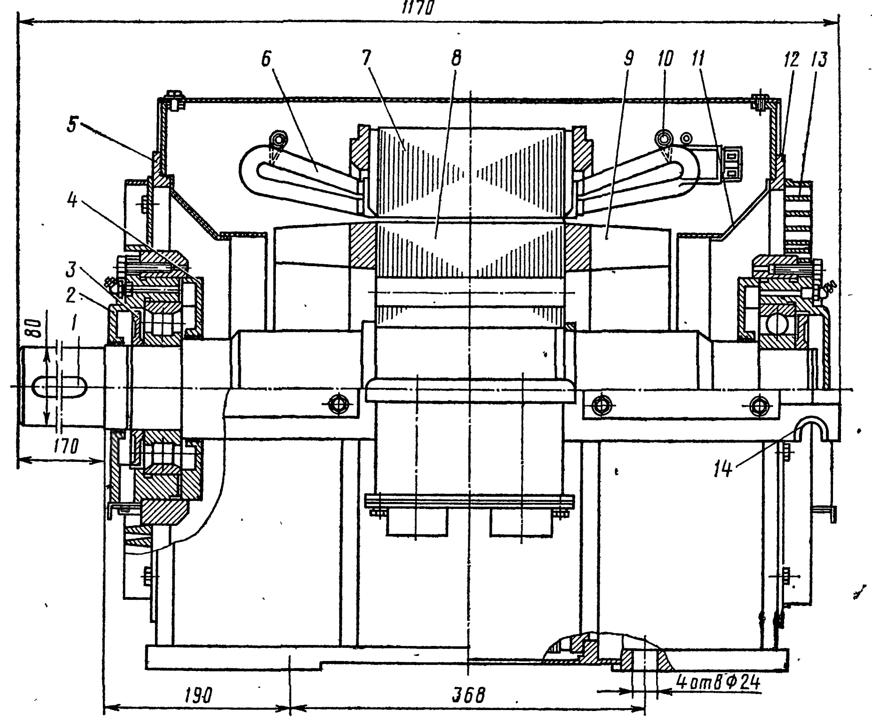


Рис. 3-3. Общий вид асинхронного двигателя с высотой оси вращения $2p=4$, ротор

1 — вал; *2* — капсула подшипника; *3* — шайба, сбрасывающая отработанную смазку; *7*—сердечник статора; *8* — сердечник ротора; *9* — обмотка ротора; *10* — кольцо бандажное; *11* — портный; *15* — кожух; *16* — коробка выводов; *17* — полустанина; *18* — болт заземления

При наличии радиальных вентиляционных каналов в роторе их располагают против соответствующих каналов в сердечнике статора. Крепят вентиляционные распорки ротора особо тщательно, чтобы исключить возможность их выпадения при вращении ротора. Изготовленный сердечник ротора с валом протачивают по наружному диаметру для обеспечения необходимой величины воздушного зазора между сердечниками статора и ротора.

У синхронных машин с $h \leqslant 315$ мм сердечник ротора собирают на валу из штампованных листов, имеющих форму многополюсной звезды (см. рис. 3-8 и 11-6). Сердечник состоит из чередующихся высоких и низких пакетов, создающих гребенчатую конструкцию, которая обеспечивает получение формы кривой поля, близкой к синусоидальной при равномерном зазоре под полюсами. При сборке ротора, после установки катушек, на низкие пакеты закрепляют роторные сегменты, имеющие форму полюсных наконечников. Сегменты скрепляют с сердечником ротора двумя продольными шпильками, продетыми через отверстия в сегментах

h=280 мм; степень защиты IP23; способ охлаждения IC01; 110 кВт; 380/660 В; короткозамкнутый:

4 — крышка подшипниковая внутренняя; *5* — щит подшипниковый; *6* — обмотка статора; щиток, направляющий воздух; *12* — щит подшипниковый; *13* — жалюзи; *14* — крюк транс-

и высоких пакетах. Сердечник ротора крепят на валу по всей длине шлицевым соединением, а с торцов — двумя кольцевыми шпонками.

У синхронных машин с $h>315$ мм, выполняемых с традиционной формой наконечников, при которой полюсные сердечники, склепанные из стальных листов толщиной 1—1,5 мм, крепят к многогранной или цилиндрической втулке, собранной также из отдельных стальных листов и расположенной на валу (см. рис. 3-9). Крепление осуществляется с помощью выступов Т-образной формы или в виде ласточкина хвоста. В наконечниках полюсных сердечников выштампованы круглые пазы для расположения в них стержней пусковой обмотки электродвигателя или успокоительной обмотки генератора.

Механический расчет крепления полюсов Т-образными выступами целесообразно проводить по методу, изложенному в [2].

Обмотка короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя. Обмотка короткозамкнутого ротора асинхронных двигателей с

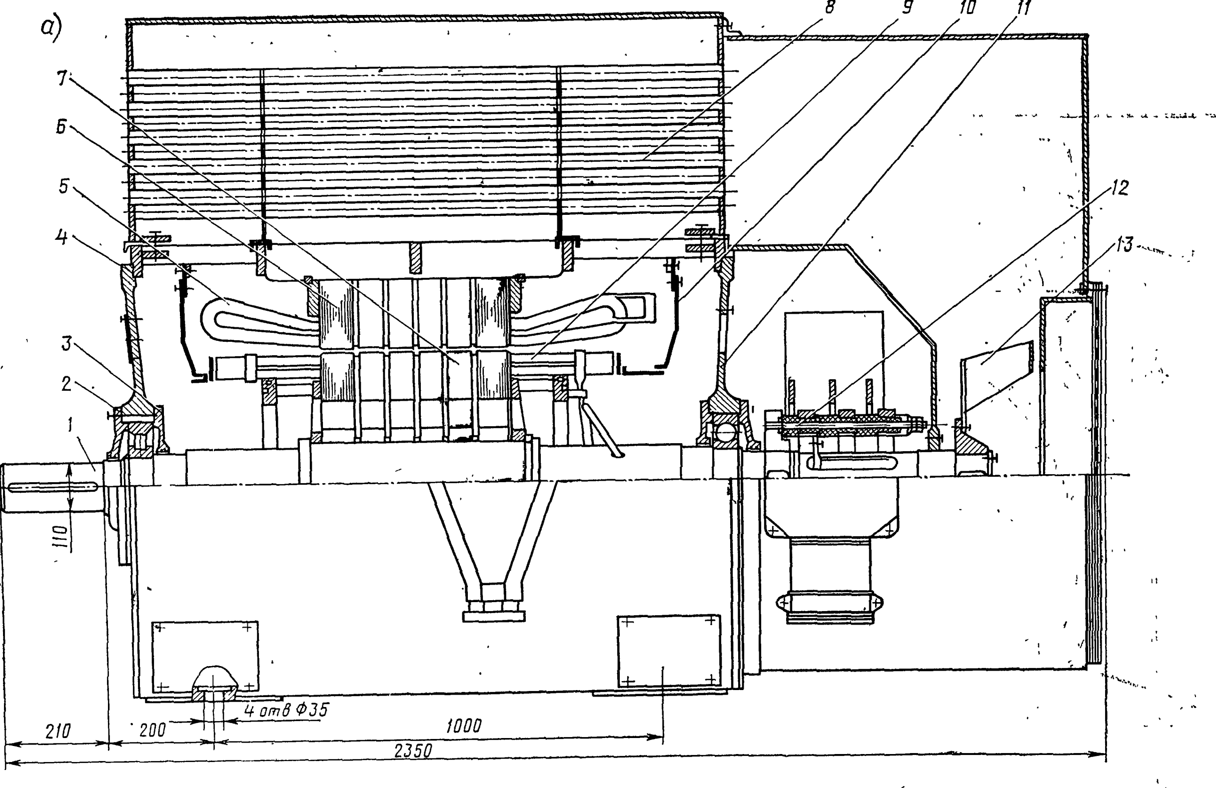


Рис. 3-4. Общий вид асинхронного двигателя с высотой оси вращения $h=450$ мм; степень защиты IP23; способ охлаждения IC0161; 630 кВт; 6000 В, $2p=6$; ротор фазный:

а — продольный разрез; *б* — поперечный разрез; *1* — вал; *2* — крышка подшипниковая наружная; *3* — крышка подшипниковая внутренняя; *4* — щит подшипниковый; *5* — обмотка статора; *6* — сердечник статора; *7* — сердечник ротора; *8* — воздухоохладитель; *9* — обмотка ротора; *10* — щиток, направляющий воздух; *11* — щит подшипниковый; *12* — узел контактных колец; *13* — вентилятор; *14* — ушко транспортное; *15* — коробка выводов

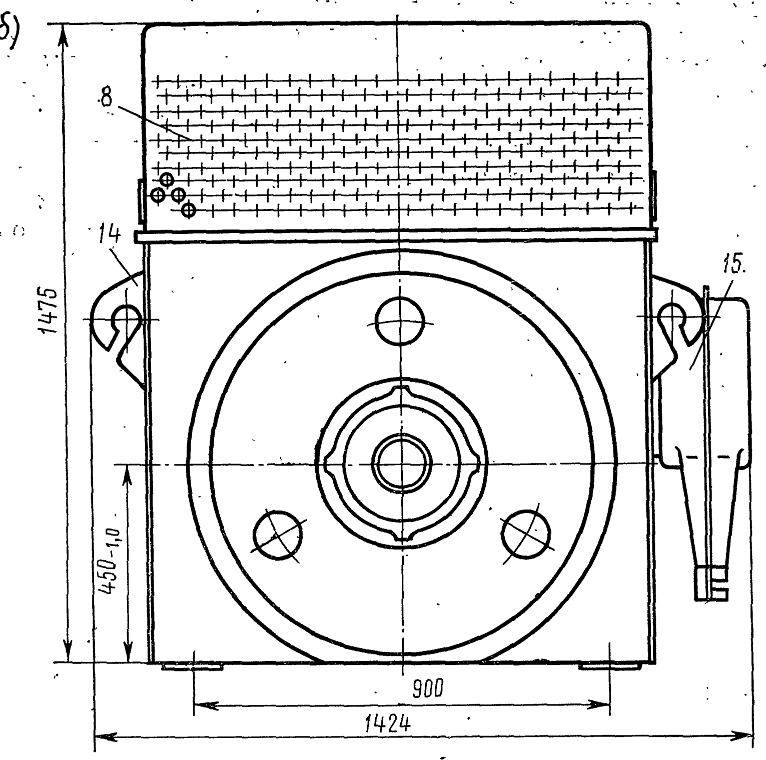


Рис. 3-4 (продолжение)

$h \leqslant 355$ мм создается путем заливки пазов собранного сердечника алюминием А5. Для получения специальных характеристик, например у двигателей с повышенным скольжением, пазы ротора могут заливаться алюминиевым сплавом АКМ12-4. При заливке пазов одновременно образуются короткозамыкающие кольца с вентиляционными лопатками и с расположенными между лопатками штырями, на которых крепят балансировочные грузы (см. рис. 3-3). Количество лопаток $N_л$ принимают в следующих пределах:

h, мм	50—100	112—250	280—355
$N_л$*	6—9	10—14	17—22

Толщина лопатки $b_л \approx 0,3\sqrt{h}$, длина $l_л \approx 0,31h$, высота $h_л \approx 0,83\sqrt[3]{h^2}$ (все размеры в мм).

Роторы двигателей с $h \leqslant 250$ мм обычно заливают в машинах для литья под давлением, а при $h = 280 \div 355$ мм — с помощью вибрационной установки. Сварную клетку короткозамкнутого ротора двигателей с $h \geqslant 400$ мм изготовляют из алюминиевых

* Меньшие значения $N_л$ соответствуют меньшим значениям h.

шин. Концы пазных стержней размещают в канавках, выфрезерованных в короткозамыкающих кольцах, а затем приваривают, причем стержни поочередно выступают с каждой стороны за короткозамыкающее кольцо, образуя вентиляционные лопатки. Стержни крепят в пазах чеканкой по всей длине сердечника через шлиц паза; при этом алюминий стержней затекает в предусмотренные для этого канавки.

Обмотка фазного ротора асинхронных двигателей. Фазный ротор двигателей с $h \leqslant 225$ мм выполняют с овальными полузакрытыми пазами и всыпной обмоткой из круглых проводов. Обмотка катушечная однослойная двухплоскостная; конструкция изоляции обмотки такая же, как у якорей машин постоянного тока (см. приложение 24).

Роторы двигателей с $h > 225$ мм (рис. 3-4) выполняют с прямоугольными полузакрытыми пазами и обмоткой из изолированных медных стержней прямоугольного поперечного сечения, которые вставляют в пазы с торца. Обмотка волновая двухслойная; для получения секции волновой обмотки одному концу стержня придают изгиб заранее по шаблону, а второй конец изгибают после вставки стержня в паз. Каждый стержень предварительно изолируют, после чего опрессовывают. Соединяют стержни в лобовых частях хомутами, в которые дополнительно впаивают вентиляционные лопатки. Конструкция изоляции стержневой обмотки приведена в приложении 22.

Марки пропиточных лаков и способы пропитки обмоток фазных роторов такие же, как для обмоток статоров (см. § 3-13). Лобовые части обмоток фазных роторов опираются на обмоткодержатели и крепятся бандажами из стеклянной нетканой ленты. Механический расчет бандажей выполняют по методике, приведенной в § 3-7 для якорей машин постоянного тока.

Обмотка ротора синхронных машин. Обмотка ротора состоит из отдельных катушек, намотанных из прямоугольной меди — изолированной (в меньших машинах) или неизолированной, гнутой на ребро (в больших машинах); катушки соединены последовательно. Выводы обмотки ротора пропускают через полый конец вала и соединяют с контактными кольцами. Конструкция изоляции обмотки ротора приведена в приложении 23. Марки пропиточных лаков и способы пропитки обмоток роторов такие же, как для обмоток статоров (см. § 3-13).

§ 3-5. Узел контактных колец

Контактные кольца применяют в асинхронных двигателях с фазным ротором и в синхронных машинах. Контактные кольца располагают на валу, обычно за подшипниковым щитом, и заключают их в коробку. При радиальной системе вентиляции такое расположение колец дает возможность унифицировать оба подшипниковых щита машины. Коробку контактных колец выполняют чугунной литой или стальной сварной, закрываемой

съемным кожухом из листовой стали. В торцовой части кожуха имеются отверстия для входа вентилирующего воздуха (отверстия защищены жалюзи, выдавленными в кожухе), в нижней части кожуха — отверстия для выхода воздуха. В меньших асинхронных двигателях с фазным ротором (h=200÷250 мм) коробку контактных колец выполняют из алюминиевого сплава (коробка имеет боковые жалюзи). Узел контактных колец охлаждается за счет вентилирующего эффекта колец.

Контактные кольца медные или латунные у машин мощностью до 100 кВт и стальные или чугунные в машинах большей мощности. Наружный диаметр контактных колец принимают меньше наружного диаметра подшипника качения для того, чтобы коробка контактных колец и подшипниковый щит машины могли быть при разборке сняты без предварительного съема контактных колец с вала.

§ 3-6. Сердечник и обмотка якоря

С листов сердечника якоря после штамповки снимают заусенцы, затем покрывают изолирующим лаком. Листы набирают непосредственно на вал; при этом по торцам сердечника во избежание «распушения» располагают утолщенные листы, образуемые точечной сваркой несколько листов толщиной 0,5 мм. Собранный сердечник якоря размещают между стальными нажимными шайбами, прессуют и закрепляют с одной стороны заплечиком вала, с другой — упорным кольцом, насаженным на вал с прессовой посадкой с нагревом.

Нажимные шайбы могут выполняться в виде обмоткодержателей с дополнительной опорой для лобовых частей обмотки. Обмоткодержатели — литые чугунные, а в больших машинах — стальные сварные. В небольших машинах применяют также опоры для лобовых частей в виде пластмассовых втулок.

Мягкие катушки двухслойной всыпной обмотки якоря из круглых проводов изготовляют намоткой на специальных шаблонах и укладывают («всыпают») через шлиц в полузакрытые пазы, выложенные корпусной изоляцией. Ширина шлица паза якоря должна обеспечивать достаточную технологичность укладки катушек. Для повышения механической прочности торцов корпусной изоляции ее края загибают на 180°. Между верхними и нижними сторонами катушек в пазах и в лобовых частях обмотки размещают изоляционные прокладки. Конструкция изоляции обмотки приведена в приложении 24.

Для закрепления всыпной обмотки от перемещения в радиальном направлении из-за действия центробежных сил применяют клинья из стеклотекстолита полукруглого поперечного сечения, а в лобовых частях — бандажи. Бандажи выполняют из нетканой стеклоленты, состоящей из параллельно уложенных стеклонитей, которые пропитаны полиэфирным связующим.

Катушки жесткой двухслойной обмотки якоря из прямоугольного провода изготовляют на шаблонах, изолируют, опрессовыва-

ют и закладывают в открытые пазы, выложенные корпусной изоляцией. Между верхними и нижними катушками размещают в пазу изоляционные прокладки из стеклотекстолита, а в лобовых частях — полосы из лакостеклослюдопласта или гибкого миканита. Конструкция изоляции обмотки приведена в приложении 25.

Обмотку в пазах крепят бандажами из стеклоленты или стальной проволоки, располагаемых в кольцевых бандажных канавках сердечника якоря. Канавки образуются при сборке сердечника путем размещения на протяжении канавок листов якоря с уменьшенным диаметром. По длине якоря устраивают несколько канавок $n_б$, с тем чтобы длина каждой канавки $l_б$ не превышала 20 мм, а общая длина канавок $n_б l_б \leqslant 0{,}35 l_2$. На лобовые части обмотки также накладывают бандажи.

Для больших машин ($h \geqslant 355$ мм), работающих в тяжелых условиях, применяют обмотку якоря повышенной надежности с усилением витковой изоляции путем применения прямоугольных проводов со стеклопряжей марок ПСД или ПСДК и дополнительного изолирования промежуточных секций в катушках стеклянной лентой или полиимидной пленкой. Конструкция изоляции обмотки повышенной надежности при классах нагревостойкости F и H приведена в приложении 26. Применение класса B для таких обмоток нецелесообразно. Крепятся обмотки в пазах клиньями из стеклотекстолита, у которых высота $h_к = 4$ мм. На лобовые части обмотки якоря накладывают бандажи из стеклоленты.

Марки пропиточных лаков и способы пропитки якорей такие же, как для обмоток статоров (см. § 3-13).

Применяемая в специальных машинах (тяговых, крановых, металлургических и др.) изоляция, именуемая «Монолит», находит в настоящее время благодаря своим преимуществам все большее распространение в машинах общего назначения. Изоляция представляет собой сочетание стеклоткани и слюдинита с термореактивным компаундом, компаунд вводится в обмотку и в изоляцию под вакуумом с последующим применением давления.

Машины с изоляцией «Монолит» обладают высокой теплопроводностью и усиленной надежностью в эксплуатации благодаря стойкости к тепловым ударам и температурным перегрузкам. Испытания машин со способом защиты IP22 и способом охлаждения IC01, а также машин со степенями защиты IP22 или IP44 и способами охлаждения IC17 или IC37 показывают, что при применении изоляции «Монолит» превышение температуры обмотки якоря над температурой воздуха внутри машины значительно снижается (см. § 10-16). В машинах со степенью защиты IP44 и способами охлаждения IC0141 или IC0041 влияние изоляции «Монолит» на превышение температуры обмотки незначительно. Перевод обмоток на изоляцию «Монолит» требует замены материалов, в основе которых содержатся синтетические пленки, на стеклослюдинитовые и слюдопластовые материалы. При исполь-

зовании изоляции «Монолит» сцепление катушек обмотки якоря со стенками пазов настолько прочное, что якоря машин с $h \leqslant 315$ мм могут работать в бесклиновом исполнении.

§ 3-7. Расчет бандажей и пазных клиньев

Бандажи и пазные клинья должны быть подвергнуты механическому расчету.

Расчет стеклобандажей. Общее число витков бандажей

$$w_{б\Sigma}=9G_{м2}(D_{н2}-h_{п2})(n_р/1000)^2\cdot 10^4/(\sigma_{доп}S_л), \qquad (3\text{-}22)$$

где $G_{м2}=9,81\ m_{м2}$ — сила тяжести обмотки якоря, Н; $n_р$ — разгонная частота вращения, равная 1,2 наибольшей частоты вращения машины; $\sigma_{доп}$ — допустимое напряжение растяжения, принимаемое для стеклоленты равным $150\cdot 10^6$ Па при классе нагревостойкости изоляции В и $130\cdot 10^6$ Па — при классах F и Н; $S_л$ — площадь поперечного сечения ленты, мм^2.

При вычислении $w_{б\Sigma}$ для активной части якоря в (3-22) подставляют силу тяжести активной части обмотки якоря $G_{м2}'=G_{м2}2l_2/l_{ср2}$, а для каждой из лобовых частей — силу тяжести одной из них — $G_{м2}'=0,5G_{м2}(1-2l_2/l_{ср2})$.

Расчет бандажей из стальной немагнитной проволоки. Расчет проводится также по (3-22) с заменой $S_л$ на площадь поперечного сечения $S_{пр}$ общего числа витков проволоки (мм^2) и подстановкой допустимого напряжения растяжения $\sigma_{доп}=450\cdot 10^6$ Па (для стальной проволоки).

Расчет пазных клиньев. Напряжение изгиба в клине (Па)

$$\sigma=84b_к(G_{м2}/l_{ср2})(D_{н2}-h_{п2})(n_р/1000)^2/h^2_к. \qquad (3\text{-}23)$$

Значение σ не должно превышать для стеклотекстолита 25×10^6 Па. Напряжение на срез в клине (Па)

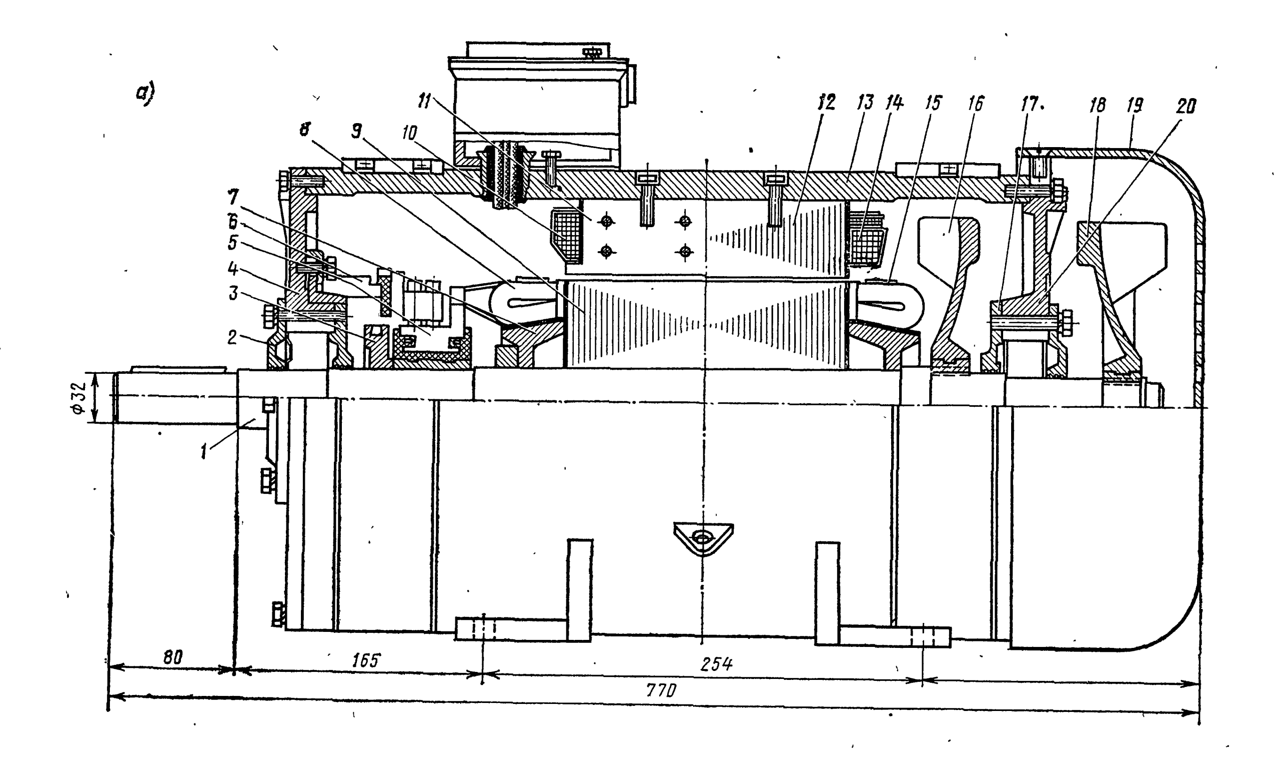
$$\tau=32(G_{м2}/l_{ср2})(D_{н2}-h_{п2})(n_р/1000)^2\cdot 10^4/h_к. \qquad (3\text{-}24)$$

Значение τ не должно превышать $15\cdot 10^6$ Па.

§ 3-8. Узел коллектора

Коллектор собирают из медных пластин трапецеидального поперечного сечения, между пластинами располагают изоляционные прокладки из миканита или слюдопласта.

У машин с $h \leqslant 200 \div 250$ мм обычно коллекторные пластины крепят пластмассой К6 или АГ-4с (рис. 3-5). При такой конструкции крепления коллекторные и изоляционные пластины штампуют по размеру, одновременно создавая в них ласточкины хвосты или кольцевые канавки для закрепления пластин в монолитный блок. Для повышения механической прочности коллектора в



a)
11
8
9
10
12
13
14
15
16
17
18
19
20
7
6
5
4
3
2
ф32
1
80
165
254
770

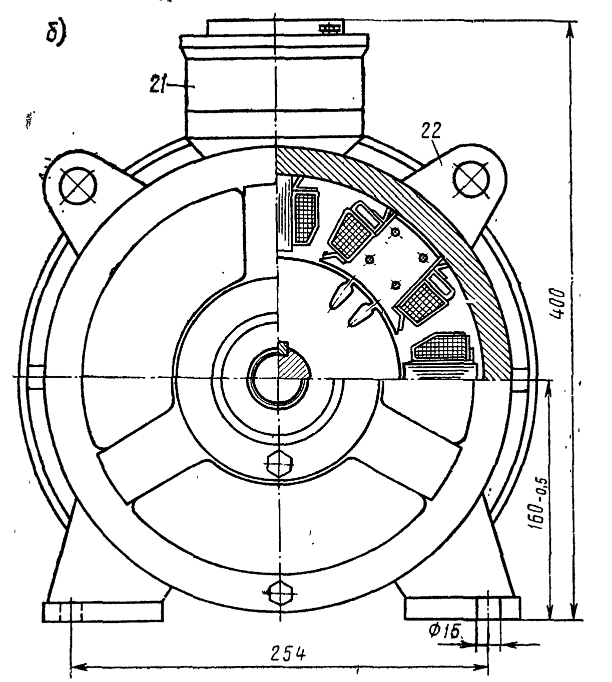
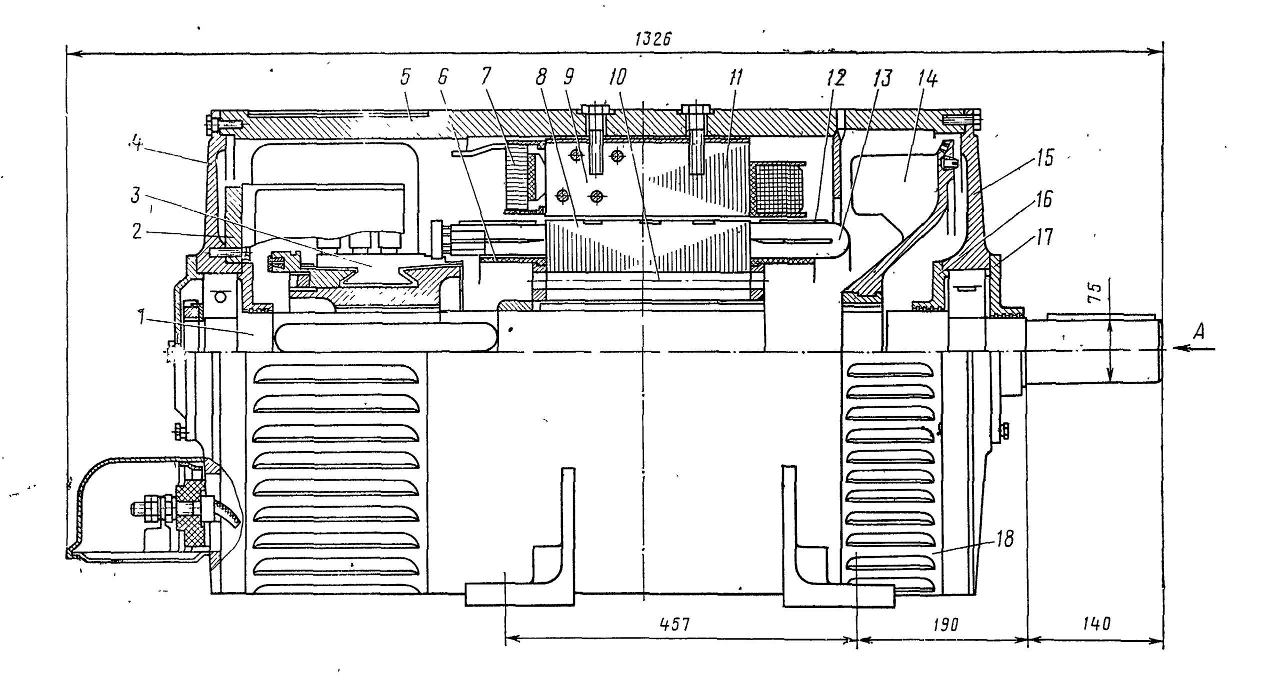


Рис. 3-5. Общий вид двигателя постоянного тока с высотой оси вращения $h=160$ мм; степень защиты IP44; способ охлаждения IC0141; 7,5 кВт, 220 В, 1500 об/мин:

а—продольный разрез; *б*—поперечный разрез; *1*—вал; *2*—крышка подшипниковая наружная; *3*—кольцо для размещения балансировочных грузов; *4*—щит подшипниковый; *5*—коллектор; *6*—траверса; *7*—обмоткодержатель; *8*—обмотка якоря; *9*—сердечник якоря; *10*—обмотка добавочных полюсов; *11*—сердечник добавочного полюса; *12*—сердечник главного полюса; *13*—станина; *14*—параллельная обмотка главных полюсов; *15*—бандаж лобовой части обмотки якоря; *16*—вентилятор внутренний; *17*—крышка подшипниковая внутренняя; *18*—вентилятор наружный; *19*—кожух наружного вентилятора; *20*—щит подшипниковый; *21*—коробка выводов; *22*—ушко транспортное



1326
4
3
2
1
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
75
A
457
190
140

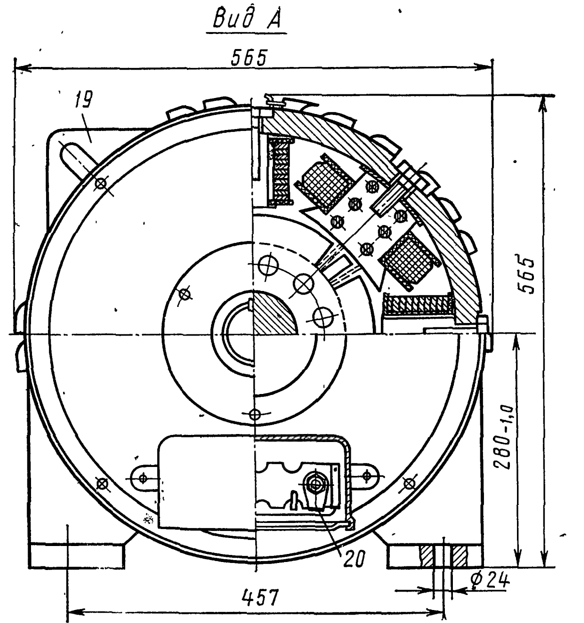


Рис. 3-6. Общий вид двигателя постоянного тока с высотой оси вращения $h=280$ мм; степень защиты IP22; способ охлаждения IC01; 132 кВт, 220 В, 1500 об/мин:

1—вал; *2*—траверса; *3*—коллектор; *4*—щит подшипниковый; *5*—станина; *6*—обмоткодержатель; *7*—обмотка добавочных полюсов; *8*—сердечник якоря; *9*—сердечник добавочного полюса; *10*—канал аксиальный вентиляционный; *11*—сердечник главного полюса; *12*—бандаж лобовой части обмотки якоря; *13*—обмотка якоря; *14*—вентилятор; *15* — щит подшипниковый; *15* — крышка подшипниковая внутренняя; *17*—крышка подшипниковая наружная; *18*—жалюзи; *19* — ушко транспортное; *20* — коробка выводов

ласточкиных хвостах или кольцевых канавках располагают стальные армирующие кольца. Кроме того, для обеспечения прессовой посадки при повторном насаживании коллектора на вал предусматривают запрессовку в центральную часть пластмассового корпуса стальной втулки. В коллекторных пластинах фрезеруют канавки, которые лудят оловянным припоем. В этих канавках располагают луженые концы секций обмотки якоря из круглых проводов и соединяют эти концы с коллекторными пластинами пайкой. Пайка производится мягким (при классе нагревостойкости изоляции B) или твердым (при классах F и H) припоем. Коллекторы с креплением пластин пластмассой имеют сниженную трудоемкость и стоимость, так как при их изготовлении исключается механическая обработка крепежных деталей. Недостатком таких коллекторов является то, что условия охлаждения пластмассового корпуса затруднены (низкая теплопроводность пластмассы, большая ее толщина, отсутствие аксиальных вентиляционных каналов).

У машин с $h > 200 \div 280$ мм (рис. 3-6) коллекторные пластины крепят с помощью чугунной или стальной втулки, стальных нажимных конусных фланцев и кольцевой гайки, заменяемой в длинных коллекторах шпильками. В коллекторах с металлическим креплением для улучшения охлаждения устраивают аксиальные вентиляционные каналы. Коллекторные пластины изолируют от корпуса втулкой и от нажимных фланцев конусными манжетами, изготовленными из миканита или слюдинита. В пластинах коллектора фрезеруют канавки, в которых размещают и припаивают медные петушки (флажки). Концы секций обмотки якоря соединяют с петушками также пайкой. Паяют мягким и твердым припоем, в зависимости от класса нагревостойкости изоляции, как указано выше для коллекторов с креплением пластин пластмассой. Конструкция переднего (со стороны, противоположной сердечнику якоря) нажимного фланца обычно предусматривает возможность размещения балансировочных грузов.

Предварительное значение высоты (мм) коллекторных пластин, с учетом 20% припуска на проточку коллекторов при эксплуатации

$$h_к = 12{,}5\sqrt[4]{D_к} - 10. \qquad (3\text{-}25)$$

Механический расчет коллекторов целесообразно проводить по методике, изложенной в [2, 15].

Щеткодержатели прикрепляют к призматическим бракетам, расположенным на траверсе; у больших машин бракеты крепят неподвижно к подшипниковому щиту. Бракеты выполняют из стеклотекстолита или из полосовой стали, изолируемой в месте крепления к траверсе. Траверсы должны обеспечивать возможность поворота при регулировании машины на испытательной станции, а затем фиксирования ее стопорным винтом в положении, установленном при испытании. Щеткодержатели выполняют

литыми латунными или штампованными из листовой латуни. Конструкция щеткодержателей должна обеспечивать постоянство нажатия пружины по мере износа щетки.

§ 3-9. Вентилятор

Центробежный вентилятор, располагаемый при аксиальной системе вентиляции на валу внутри машины со степенью защиты IP22 или IP23 и способом охлаждения IC01, выполняют литым из алюминиевых сплавов у машин меньшей мощности и стальным сварным или клепаным — у машин большей мощности. Алюминиевый вентилятор обычно имеет залитую стальную втулку, дающую возможность сохранить необходимую посадку при повторной насадке на вал (рис. 3-6). У машин меньшей мощности в последнее время применяют вентиляторы из пластмассы.

Для машин со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 для наружного обдува корпуса используют радиальный вентилятор (с прямыми лопатками), расположенный на конце вала со стороны, противоположной приводу. Вентиляторы также выполняют литыми из алюминиевых сплавов у меньших машин, сварными или клепаными из листовой стали — у больших. Наружный диаметр вентилятора $D_{вен2} \approx 0{,}85\ D_{корп}$, ширина (длина) лопатки $l_л \approx 0{,}2\ D_{корп}$, число лопаток при $n \leqslant 1500$ об/мин $N_л \approx$ $\approx 1{,}25\sqrt[3]{D_{корп}}$, при $n > 1500$ об/мин $N_л \approx \sqrt[3]{D_{корп}}$.

У асинхронных двигателей и машин постоянного тока со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 для улучшения теплообмена на валу внутри машины располагаются дополнительно вентилятор-мешалку (см. рис. 3-5). Наружный диаметр мешалки обычно такой же, как у вентилятора для обдува, а $l_л \approx$ $\approx 0{,}13\,D_{корп}$.

Вентилятор закрывают штампованным или сварным кожухом, изготовленным из стали толщиной 1—2 мм. На торце кожуха выполняют отверстия любой формы для входа воздуха; при этом степень защиты кожуха должна удовлетворять ГОСТ 17494-72.

§ 3-10. Станина

Машины переменного тока. Станины машин переменного тока в основном изготовляют чугунными литыми; при этом обеспечивается высокая надежность машин благодаря достаточной механической прочности и коррозионной стойкости чугуна, а также стабильности размеров при сборочных операциях. В малых асинхронных двигателях с высотой оси вращения $h \leqslant 71$ мм наряду с чугунными применяют также станины из алюминиевых сплавов, образуемые обливкой сердечника статора в машинах для литья под давлением. Такая конструкция весьма технологична, сокращает трудоемкость изготовления статора, однако при $h > 71$ мм значительно сказываются деформация внутреннего отверстия

сердечника статора при обливке его алюминиевыми сплавами и снижение механической прочности.

В машинах с $h \geqslant 280$ мм кроме чугунных используют также сварные станины из стального проката. Один из видов таких станин — коробчатая станина асинхронных двигателей с $h = 280 \div 355$ мм — представляет собой сварную трубу со стойками, образующими опорные лапы и полукруговые ребра для посадки сердечника и подшипниковых щитов. В машинах с $h < 280$ мм сварные станины применяют реже из-за многообразия отдельных элементов деталей, предназначенных для сварки (ребер, ушек, бобышек и др.), затрудняющего использование автоматизированных и механизированных производственных процессов на участке сварки.

Станины машин со степенью защиты IP23 (см. рис. 3-3) выполняются с внутренними продольными ребрами, обрабатываемыми под посадку сердечника статора. Станины при радиальной системе вентиляции имеют в боковых частях вентиляционные отверстия, предназначенные для выхода охлаждающего воздуха. Для обеспечения степени защиты IP23 отверстия закрывают жалюзи, которые могут изготовляться методом штамповки из листовой стали или литыми из алюминиевых сплавов. При аксиальной системе вентиляции отверстия в станине отсутствуют.

Станины машин со степенью защиты IP44 (см. рис. 3-2) обычно имеют продольные ребра на наружной поверхности. Высота ребра $h_р \approx 0{,}6\sqrt[4]{h^3}$, число ребер $n_р \approx 1{,}6\sqrt[3]{h}$. В машинах с $h > 355$ мм для увеличения поверхности охлаждения в стальной станине применяют вваренные по всей окружности трубки распределенного воздухоохладителя.

Станины машины со способом монтажа IM1001 имеют опорные лапы, отливаемые заодно с чугунной станиной или приваренные в стальной станине. В станинах асинхронных двигателей, образуемых из алюминиевых сплавов, лапы отливают отдельно, а затем крепят к статору.

Для размещения коробки выводов в станине предусматривают прилитые или приваренные фланцевые основания с окнами для выводных проводов обмотки. Удобным в эксплуатации является расположение коробки выводов сверху станины, так как при повороте коробки подводимый кабель может присоединяться с разных сторон машины.

Для обеспечения требований по технике безопасности на станине размещают наружные зажимы для заземления корпуса машины. Зажимы снабжают устройством от самоотвинчивания и крепят около опорных лап и в коробке выводов. При выполнении машин без лап один зажим располагают на фланцевом щите.

Для обеспечения посадки и центрирования подшипниковых щитов на торцах станины предусматривают кольцевые цилиндрические заточки (внутренние или наружные), а для крепления щитов — приливы или ушки с нарезанными отверстиями для болтов.

Станины протачивают по внутреннему диаметру под посадку отдельно изготовленных сердечников. Если сердечники набирают из отдельных листов прямо в станину, то при проточке в станине выбирают круговые канавки для крепления спрессованного сердечника кольцевыми или поперечными шпонками.

На станине в верхней части предусмотрены рым-болты (см. приложение 39) или транспортные ушки, предназначенные для подъема машины. Машины массой менее 30 кг не имеют специальных устройств для подъема. К станине на видном месте крепят табличку из некоррозийных материалов с техническими данными машины.

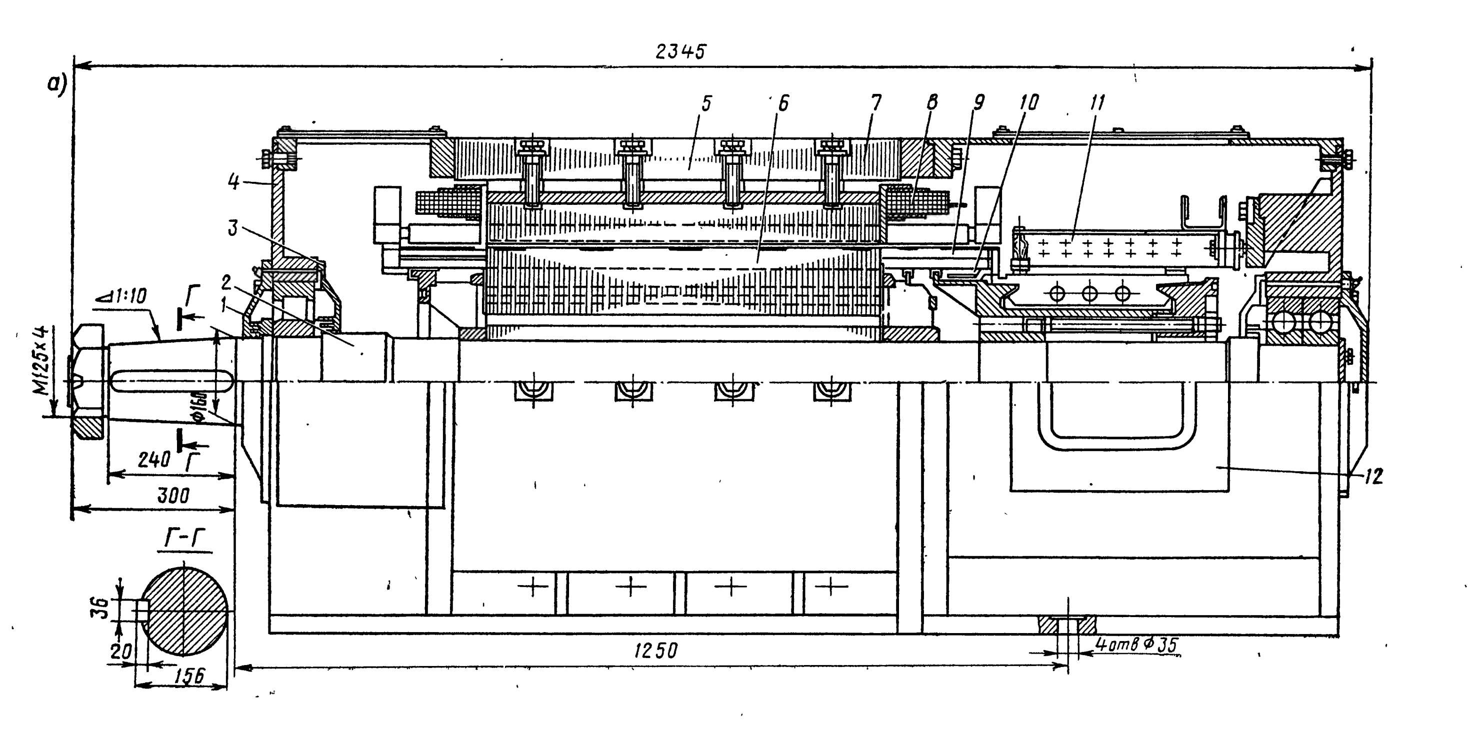
Машины постоянного тока. Исполняются с монолитной или шихтованной станиной. Монолитная станина имеет не только механическое назначение, но и одновременно является частью магнитопровода; поэтому ее изготовляют из стали с достаточно высокой магнитной проницаемостью. У машин меньшей мощности с $h=80\div200$ мм для изготовления монолитной станины обычно применяют отрезки цельнотянутых стальных труб, к которым приваривают опорные лапы. Такой способ изготовления станины снижает ее трудоемкость и стоимость. Для больших машин с $h=225\div315$ мм цилиндрическую часть станины изготовляют из загнутого толстолистового проката, причем для обеспечения магнитной симметрии продольный сварной шов цилиндра располагают по оси главных полюсов. К цилиндрической части приваривают опорные лапы.

В станинах предусматривают кольцевые центрирующие заточки, рым-болты или транспортные ушки и наружные зажимы для заземления корпуса машины, крепление таблички с техническими данными машины (такое же, как в машинах переменного тока).

Коробку выводов у машин с $h=80\div200$ мм располагают сверху станины, а у машин с $h>200$ мм — обычно сбоку.

Для повышения жесткости оболочки машин целесообразно укорачивать вылеты подшипниковых щитов за счет удлинения станины, стремясь к дисковой форме щитов. При таком удлинении части станины, значительно выступающие за пределы длины сердечника якоря, могут выполняться с уменьшенной толщиной, особенно в тех местах, где должны располагаться люки для обслуживания коллектора и щеточного узла.

Шихтованные сердечники станин у машин с $h\leqslant315$ мм выполняют набором круглых штампованных колец или сегментов из электротехнической стали. Сердечники скрепляют по наружной поверхности утопленными скобами и размещают в станине (корпусе) в основном такой же конструкции, как и в машинах переменного тока. Сердечники могут также изготовляться из отштампованных листов, образующих цельный блок станины с сердечниками главных и добавочных полюсов; наконечники полюсов при этом изготовляют и скрепляют заклепками отдельно, а затем привинчивают к сердечникам. У машин с $h\geqslant355$ мм шихтованные сердечники выполняют восьмигранной формы без обшивки, с при-



а)
2345
4
3
2
1
5
6
7
8
9
10
11
12
⊲1:10
Г
Г
М125×4
Ф160
240
300
Г-Г
36
20
156
1250
4отв Ф35

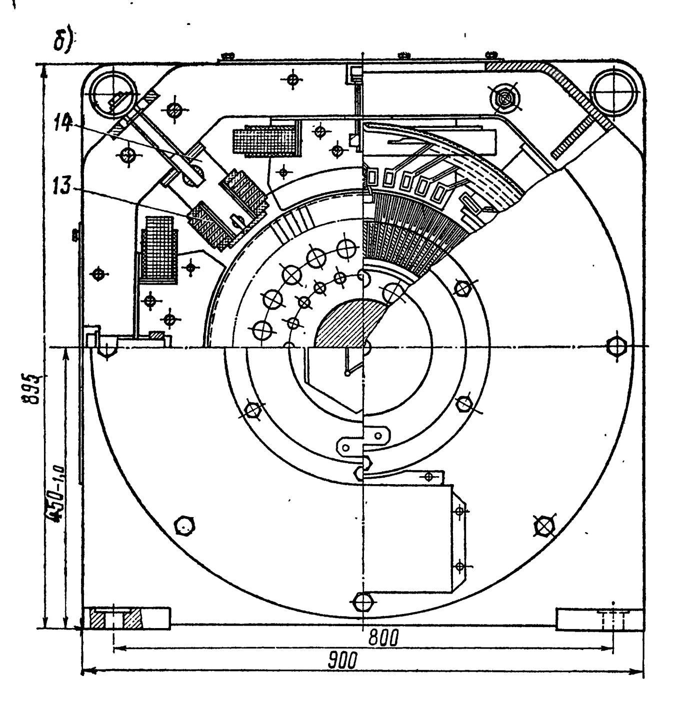


Рис. 3-7. Общий вид двигателя постоянного тока с высотой оси вращения $h=450$ мм; степень защиты IP22; способ охлаждения IC01; 500 кВт; 440 В, 500 об/мин:

а—продольный разрез; *б*—поперечный разрез; *1*—крышка подшипниковая наружная; *2*—вал; *3*—крышка подшипниковая внутренняя; *4*—щит подшипниковый; *5*—сердечник станины; *6*—сердечник якоря; *7*—сердечник главного полюса; *8*—обмотка возбуждения главных полюсов; *9*—обмотка якоря; *10*—уравнительные соединения; *11*—бракет щеткодержателей; *12*—люк коллекторный; *13*—обмотка добавочных полюсов; *14*—сердечник добавочного полюса

варенными к ним с двух сторон опорными частями из листового стального проката (рис. 3-7). При такой форме сердечников главные и добавочные полюсы размещаются более компактно, благодаря чему уменьшаются габариты и высота оси вращения машины. К станине приварены сегменты с нарезанными отверстиями для крепления подшипниковых щитов болтами. Для подъема и транспортировки машин в станине предусмотрены транспортные ушки.

§ 3-11. Подшипниковые щиты и подшипники

Подшипниковые щиты изготовляют либо чугунными литыми, либо сварными из стального проката. Для малых машин применяют щиты, изготовляемые литьем под давлением из алюминиевых сплавов. Для обеспечения минимальной деформации при закреплении щитов в приспособлениях металлообрабатывающих станков, а также уменьшения перекоса подшипников при сборке машин аксиальные размеры проектируемых щитов целесообразно сокращать, стремясь приблизить их форму к диску.

В защищенных машинах с исполнением по защите IP23 подшипниковые щиты при радиальной системе вентиляции одинаковые с обеих сторон машины; при аксиальной системе вентиляции щиты обычно не унифицируют из-за наличия с одной стороны машины внутреннего вентилятора (рис. 3-8). При радиальной вентиляции в торцовой части подшипниковых щитов располагают отверстия для входа охлаждающего воздуха; при аксиальной — отверстия для входа и выхода воздуха устраивают в нижней части щитов. Вентиляционные отверстия закрывают жалюзи.

При радиальной вентиляции для повышения ее эффективности на внутренней части подшипниковых щитов крепят направляющие воздух щитки, выполняемые из листовой стали в виде воронок. Щитки располагают на расстоянии 5—7 мм от торцов лопаток ротора в аксиальном направлении.

Подшипниковые щиты закрытых машин с исполнением по защите IP44 и со способами охлаждения IC0141 и IC0041 — глухие. При выполнении таких щитов из алюминиевых сплавов у них предусматривают оребренные торцы, увеличивающие поверхность охлаждения машины. Щиты имеют цилиндрическую круговую заточку (замок) для посадки на заточку станины при сборке машины. Для крепления к станине в щитах имеются ушки с отверстиями для болтов.

В центральной части щитов предусматривается втулка со сквозной проточкой для посадки подшипников качения, которые практически полностью вытеснили в машинах мощностью до 1000 кВт подшипники скольжения. Основными преимуществами подшипников качения являются упрощение обслуживания в эксплуатации, компактность и уменьшенные размеры подшипникового узла, малые потери на трение, незначительный износ, обеспечивающий постоянство воздушного зазора.

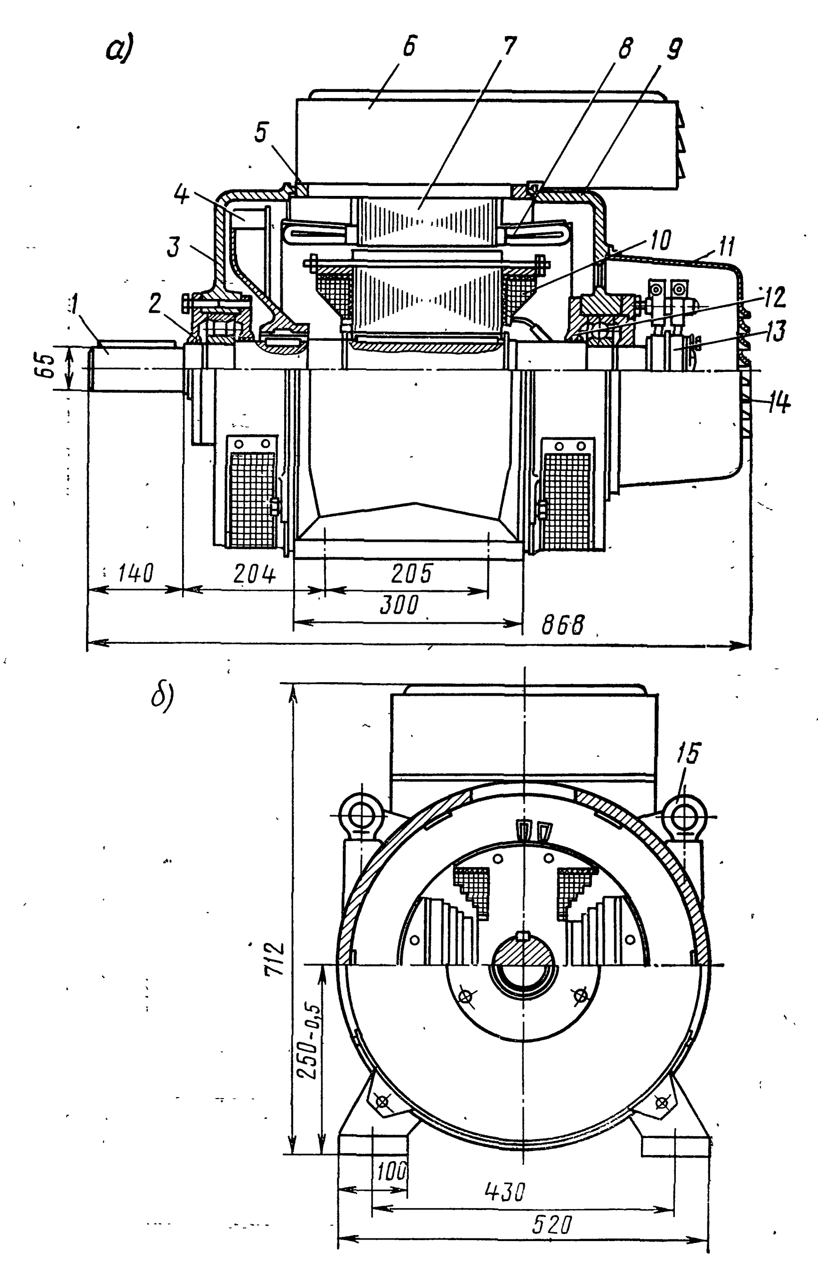
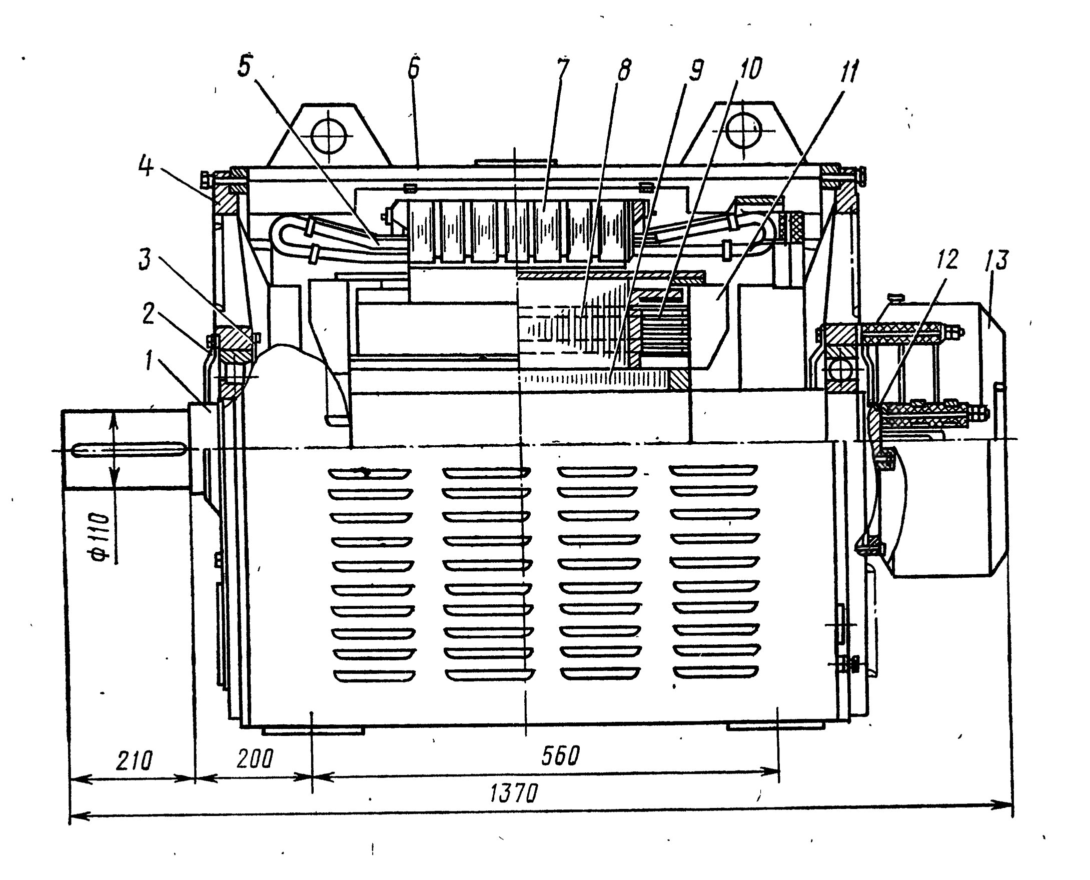


Рис. 3-8. Общий вид синхронного генератора с высотой оси вращения $h=250$ мм; степень защиты IP23; способ охлаждения IC01; 30 кВт, 230 В, 1500 об/мин:

а — продольный разрез; *б* — поперечный разрез; *1* — вал *2* — крышка подшипниковая наружная; *3* — щит подшипниковый передний; *4* — вентилятор; *5* — корпус статора; *6* — блок регулирования напряжения; *7* — сердечник статора; *8* — обмотка статора; *9* — щит подшипниковый задний; *10* — обмотка возбуждения полюсов; *11* — колпак; *12* — крышка подшипниковая внутренняя; *13* — узел контактных колец; *14* — жалюзи; *15* — рым-болт



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
ф110
210
200
560
1370

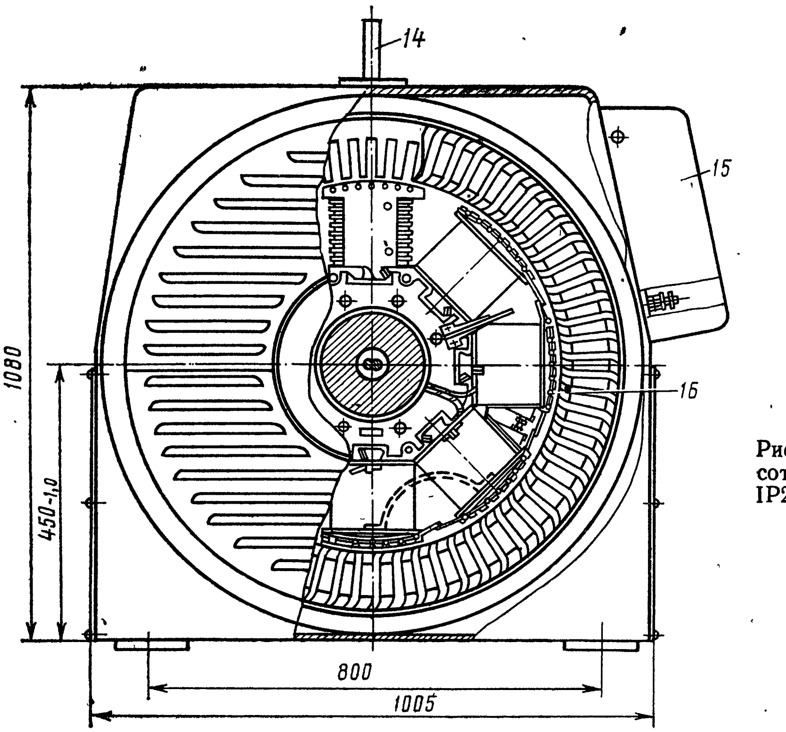


Рис. 3-9. Общий вид синхронного двигателя с высотой оси вращения $h = 450$ мм; степень защиты IP23; способ охлаждения IC01; 250 кВт, 380 В, 500 об/мин:

1—вал; *2*—крышка подшипниковая наружная; *3*—крышка подшипниковая внутренняя; *4*—щит подшипниковый; *5*—обмотка статора; *6*—корпус статора; *7*—сердечник статора; *8*—сердечник полюса; *9*—втулка ротора; *10*—обмотка возбуждения полюсов; *11*—лопатка вентиляционная; *12*—узел контактных колец ротора; *13*—колпак; *14*—ушко транспортное; *15* — коробка выводов; *16*—пусковая обмотка

Наружные кольца подшипников крепят по торцам подшипниковыми крышками, фиксирующими расположение подшипников в аксиальном направлении. Внутреннее кольцо подшипника насаживается на вал с плотной посадкой, а наружное входит во втулку подшипникового щита подвижно, так что при разборке машины подшипники остаются на валу. Этим самым облегчается как сборка, так и разборка машины.

В малых машинах с $h \leqslant 160 \div 200$ мм оба подшипника шариковые радиальные однорядные по ГОСТ 8338—75; при этом с одной стороны машины между подшипниковой крышкой и подшипником оставляют зазор, который обеспечивает возможность аксиального перемещения вала, компенсирующего неточности осевых размеров при сборке машины. Для компенсации указанных отклонений могут также применяться с обеих сторон машины пружинящие стальные гофрированные шайбы.

В бóльших машинах со стороны выступающего конца вала располагают роликовый подшипник радиальный с короткими цилиндрическими роликами по ГОСТ 8328—75; при этом отпадает надобность в зазоре или в пружинящих шайбах, так как роликовый подшипник обеспечивает возможность аксиального перемещения вала (рис. 3-9).

Радиальные подщипники могут воспринимать как радиальную, также и осевую нагрузку, не превышающую 70% неиспользованной радиальной нагрузки. При соблюдении этого условия машины с шарикоподшипниками могут работать как с горизонтальным, так и вертикальным расположением вала.

В машинах, предназначенных для тяжелых режимов работы, например в используемых во вспомогательных устройствах металлургической промышленности двигателях постоянного тока с $h \geqslant 355$ мм, применяют сдвоенные радиально-упорные шариковые подшипники по ГОСТ 832—78, которые воспринимают на себя нагрузку от силы тяжести якоря и осевую составляющую нагрузки от передачи момента.

Для подшипников качения используют консистентную мазеобразную смазку, которой заполняют около $^2/_3$ смазочной камеры; заполнение смазкой всего объема камеры ведет к повышению нагрева подшипников. Для консистентной смазки достаточны несложные уплотнения в виде прямоугольных кольцевых канавок, протачиваемых в подшипниковых крышках; канавки при сборке машины также заполняют консистентной смазкой.

В подшипниковых щитах может быть предусмотрено устройство для пополнения и частичной замены консистентной смазки. При этом свежая смазка подается специальным приспособлением под давлением в пространство за внутренней подшипниковой крышкой, вытесняя отработанную смазку через наружную крышку подшипникового узла.

Смена и пополнение смазки не требуются, когда в машинах применяют шариковые радиальные однорядные подшипники закрытого типа с двусторонним уплотнением, не выходящим за га-

бариты подшипников, и с заложенной на весь срок службы консистентной смазкой по ГОСТ 8882—75. При установке таких подшипников отверстие под их посадку во втулке подшипникового щита делают не сквозным, а глухим, т. е. совмещают подшипниковую крышку со щитом.

У машин, крепление которых осуществляется фланцем (с лапами и без лап), подшипниковый щит отливается совместно с фланцем. Размеры фланцев должны соответствовать ГОСТ 18709—73 и 20839—75.

§ 3-12. Расчет подшипников

Расчет подшипников качения. При расчете подшипников качения определяют их типоразмеры, которые обеспечивают необходимый срок службы при заданных нагрузке и частоте вращения. Условные обозначения и размеры подшипников, а также другие параметры их приведены в приложении 36.

Наибольшая радиальная нагрузка (Н) на подшипник A

$$R_{\text{А}}=(G'_2+T_0)b/l+F_{\text{п}}c/l; \qquad (3\text{-}26)$$

на подшипник B

$$R_{\text{В}}=(G'_2+T_0)a/l+F_{\text{п}}(l+c)/l. \qquad (3\text{-}27)$$

Динамическая приведенная нагрузка (Н) для шарикоподшипника однорядного радиального

$$Q=k_6R \text{ при } A/R\leqslant e; \qquad (3\text{-}28)$$

$$Q=k_6(0{,}56R+YA) \text{ при } A/R>e; \qquad (3\text{-}29)$$

роликоподшипника радиального с короткими цилиндрическими роликами — по (3-28);

шарикоподшипника радиально-упорного сдвоенного

$$Q=k_6(R+0{,}92A) \text{ при } A/R\leqslant 0{,}68; \qquad (3\text{-}30)$$

$$Q=k_6(0{,}67R+1{,}41A) \text{ при } A/R>0{,}68 \qquad (3\text{-}31)$$

Здесь k_6 — коэффициент, учитывающий характер нагрузки машины; при режиме работы с умеренными толчками и кратковременной перегрузкой до 150% от номинальной нагрузки — $k_6=1{,}5$; A — аксиальная нагрузка, Н; Y — коэффициент приведения аксиальной нагрузки к радиальной.

Значения e и Y однорядных радиальных подшипников в зависимости от A/C_0 [где C_0 — статическая грузоподъемность (Н), предварительно принятого типа подшипника (из приложения 36)] определяют по следующим данным:

A/C_0	0,014	0,028	0,056	0,084	0,11	0,17	0,28	0,42	0,56
e	0,19	0,22	0,26	0,28	0,30	0,34	0,38	0,42	0,44
Y	2,30	1,99	1,71	1,55	1,45	1,31	1,15	1,04	1,00

Для промежуточных значений A/C_0 применяют линейную интерполяцию. При $A/C_0<0{,}19$ приведенная нагрузка $Q=R$. При отсутствии аксиальной нагрузки и горизонтальном расположении

вала осевое магнитное притяжение в расчете не учитывается, а при вертикальном расположении вала

$$A=1{,}15G'_2+F_c+0{,}1R. \qquad (3\text{-}32)$$

Необходимая динамическая грузоподъемность (Н) шарикоподшипника

$$C=(Q/25{,}6)\sqrt[3]{Ln}; \qquad (3\text{-}33)$$

роликоподшипника

$$C=(Q/18{,}5)\ (Ln)^{0{,}3}, \qquad (3\text{-}34)$$

где L — расчетный срок службы подшипника, ч (обычно принимают 12 000 ч); n — наибольшая рабочая частота вращения машины, об/мин.

Из приложения 36 выбирают подшипник соответствующей серии, у которого внутренний диаметр равен диаметру шейки вала, а динамическая грузоподъемность — не менее значения, вычисленного по (3-33) или (3-34).

Пример расчета подшипников качения. Подшипники рассчитывают по данным, указанным в примере расчета вала (см. § 3-3). При этом принимаем нагрузку с умеренными толчками ($k_6=1{,}5$); подшипник со стороны A — шариковый; со стороны B — роликовый; аксиальная нагрузка отсутствует; расчетный срок службы подшипников 12 000 ч; наибольшая частота вращения 1500 об/мин.

Параметр	Источник	Расчет параметров
R_A, Н	(3-26)	$(1752+1692)\frac{330}{700}+2053\frac{120}{700}=1975$
Q_A, Н	(3-28)	$1{,}5\cdot1975=2962$
C, Н	(3-33)	$\frac{2962}{25{,}6}\sqrt[3]{12\,000\cdot1500}=30\,300$
R_B, Н	(3-27)	$(1752+1692)\frac{370}{700}+2053\frac{700+120}{700}=4220$
Q_B, Н	(3-28)	$1{,}5\cdot4220=6330$
C, Н	(3-34)	$\frac{6330}{18{,}5}(12\,000\cdot1500)^{0{,}3}=51\,620$

Из приложения 36 для стороны A выбираем шарикоподшипник № 215 легкой серии со значением $C=51\,000$ (с запасом надежности), для стороны B — роликоподшипник № 2215 легкой узкой серии со значением $C=76\,500$ (с запасом надежности).

§ 3-13. Сердечник и обмотка статора

Сердечник статора. Сердечник статора машин с $h\leqslant250$ мм набирают на центрирующую оправку вне станины из отштампованных листов стали, спрессовывают, потом без снятия давления проверяют длины в канавках, расположенных на наружной поверхно-

сти сердечника. Для сердечника статора применяют крепление стальными скобами, расположенными в канавках по наружной поверхности сердечника. При таких способах сборки выдерживаются необходимые внутренний диаметр и форма сердечника без растачивания, снижаются потери в стали, уменьшается трудоемкость укладывания обмотки, выполнения соединений и пропитки.

При коробчатой станине сердечники статоров двигателей также изготовляют вне станины с обмоткой и укладывают при сборке двигателей в соответствующие заточки на внутренних ребрах полустанины. К собранному сердечнику приваривают по бокам стальные пластины, которыми сердечник опирается на края станины и крепится к ней болтами.

У машин с $h>250$ мм сердечник собирают набором листов непосредственно в станину; после опрессовки сердечник закрепляют в станине кольцевыми или поперечными шпонками. При таком способе сборки сердечника возникает необходимость расточки его по внутреннему диаметру.

Сердечники статоров двигателей с $h\leqslant 250$ мм протачивают по наружному диаметру для улучшения теплового контакта со станиной. Обмотанный и пропитанный сердечник впрессовывают в станину, если станина не образуется путем обливки сердечника алюминиевыми сплавами.

У сердечников длиной более 300—350 мм радиальные вентиляционные каналы образуют с помощью двутавровых распорок, расположенных радиально на каждом зубце, с обеспечением их надежного закрепления приваркой к листам статора.

Обмотка статора. Однослойная обмотка статора распространена только у асинхронных двигателей относительно небольшой мощности с $h\leqslant 160$ мм, двухслойная обмотка статора — в бо́льших асинхронных двигателях, а также в синхронных машинах. Для низковольтных машин ($U\leqslant 660$ В) с $h\leqslant 280$ мм обычно применяют трапецеидальные полузакрытые пазы со всыпной обмоткой, в низковольтных машинах с бо́льшими значениями h — прямоугольные полуоткрытые, в высоковольтных — прямоугольные открытые пазы с жесткими формованными катушками.

У асинхронных двигателей с $h=50\div 160$ мм, выпускаемых в больших количествах, для всыпной обмотки статора используют автоматические станки, работа которых более эффективна при выполнении двигателей с однослойной концентрической обмоткой. При этом катушечные группы наматывают обычно раздельно, а затем статорообмоточный станок выполняет операцию втягивания катушек в пазы статора, заклинивает обмотку в пазах и формует лобовые части обмотки. Концентрические катушки изготовляют из круглых проводов соответствующего класса нагревостойкости изоляции, причем ширина шлица полузакрытого паза должна обеспечивать достаточную технологичность укладки обмотки.

Пазовые коробочки, нарезанные из однослойного рулонного материала, также формуют и укладывают в пазы станками-автоматами. Вылет коробочек с каждой стороны сердечника

составляет 4—7 мм, причем для повышения механической прочности торцов пазовых коробочек их края загибают на 180°.

Клинья выполняют из листового изоляционного материала, придавая им изгиб по форме верхней части паза. Из этого же материала изготовляют прокладки, укладываемые в лобовые части обмотки между головками катушек. Пайки соединений катушечных групп, образующих фазы обмотки, заключают в изоляционные трубки. Лобовые части обмотки с обеих сторон двигателя бандажируют на специальных станках стеклошнуром. Обмотанные статоры пропитывают.

Двухслойную всыпную обмотку статора из круглых проводов у машин с $h \geqslant 180$ мм изготовляют вручную или с механизированной укладкой катушек. Принципиальная конструкция изоляции обмотки этих машин такая же, как у асинхронных двигателей с $h = 50 \div 160$ мм, за исключением того, что между верхними и нижними слоями обмотки размещают коробчатые изоляционные прокладки. Вылеты коробочек с каждой стороны сердечника составляют 7—10 мм. Конструкция изоляции одно- и двухслойной всыпной обмотки статора приведена в приложении 27.

Двухслойную обмотку статора машин с $h > 250 \div 280$ мм изготовляют из формованных полукатушек, укладываемых в прямоугольные полуоткрытые пазы. Провод обмотки — прямоугольный. Предварительно намотанной на шаблоне заготовке-«лодочке», состоящей из двух полукатушек, скрепленной обволакивающим компаундом, придают необходимую форму на растягивающем устройстве; затем полукатушки опрессовывают в пазовых частях и дополнительно скрепляют лакированной фенилоновой бумагой. Лобовые части полукатушек скрепляют в двух-трех местах бандажами из стеклоленты, а у крайних полукатушек фаз обмотки лобовые части дополнительно изолируют стеклолентой. Полукатушки укладывают поочередно через шлиц в полуоткрытые пазы.

Для обеспечения механической прочности обмотки при воздействии на нее значительных усилий, возникающих при прямом включении двигателя в сеть, а у генераторов при к. з., лобовые части обмотки крепят стеклошнуром к бандажным кольцам. Между лобовыми частями катушек располагают распорки из стеклотекстолита с последующим перевязыванием стеклошнуром в шахматном порядке. Торцы пазовых коробочек выступают из сердечника статора на 15—20 мм. Конструкция изоляции машин с полуоткрытыми пазами статора приведена в приложении 28.

У тихоходных двигателей с $h = 280$ и 315 мм при $2p = 10$ и 12 обычно применяют для повышения энергетических показателей трапецеидальные полузакрытые пазы с двухслойной всыпной обмоткой, хотя при этом надежность обмотки несколько снижается в сравнении с обмоткой из жестких формованных катушек в полуоткрытых пазах. Конструкция изоляции обмотки статора таких двигателей приведена в приложении 29.

Для пропитки обмоток статора рекомендуются следующие лаки и способы пропитки:

Класс нагревостойкости изоляции	B	F, H
Марка лака и способ пропитки	КП-34, КП-103, БСП (без растворителей, струйный метод)	КО-964Н (с растворителем, под вакуумом и давлением)

При использовании этих пропиточных лаков отпадает необходимость в применении покровных эмалей на лобовых частях обмоток.

Обмотку статора двигателей с $h \geqslant 400$ мм на напряжение 6000 В выполняют двухслойной из жестких формованных катушек. Провод обмотки прямоугольный; намотанные из этого провода «лодочки» растягивают и опрессовывают, затем катушки изолируют и укладывают в прямоугольные открытые пазы. Крепление лобовых частей такое же, как у низковольтных двигателей с жесткими катушками. Для повышения надежности и улучшения теплопроводности изоляции обмотки статора в высоковольтных машинах целесообразно применение изоляции «Монолит» (см. § 3-6). Конструкция изоляции обмотки статора двигателей на напряжение 6000 В приведена в приложении 30.

§ 3-14. Главные и добавочные полюса

Сердечники главных и добавочных полюсов собирают из неизолированных штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 или 1,0 мм. Крайние листы полюсов выполняют утолщенными путем точечной сварки нескольких листов обычной толщины; это необходимо для уменьшения распушения полюсов. При штамповке в листах полюсов предусматривают отверстия для заклепок. Собранный из отдельных листов полюс прессуют и скрепляют стальными заклепками (не менее четырех). Общая площадь поперечного сечения заклепок составляет 2—3% площади листа полюса.

Полюса к монолитной станине крепят болтами, ввинчиваемыми в машинах с $h \leqslant 315$ мм в отверстия, нарезанные непосредственно в сердечниках полюсов, а при $h > 315$ мм — в стальных стержнях, вставляемых в выштампованные для них отверстия в полюсах. В машинах с компенсационной обмоткой в наконечниках главных полюсов предусматривают пазы для ее размещения.

Наконечники добавочных полюсов машин с $h \leqslant 315$ мм шире сердечников; образуемые при этом боковые выступы служат в качестве опоры для катушек полюсов. В машинах с $h > 315$ мм необходимость в таких выступах отпадает, так как катушки крепят к сердечникам полюсов хомутами; сердечники добавочных полюсов этих машин выполняют из листов Т-образной формы для уменьшения магнитной индукции в наиболее насыщенной части полюсов и для повышения механической прочности их крепления.

Между полюсами и станиной располагают прокладки из листовой стали, изменением количества которых регулируют величину воздушного зазора между якорем и полюсами. В доба-

вочных полюсах машин с $h>315$ мм регулирование может осуществляться также прокладками из немагнитных материалов. В машинах с $h \leqslant 315$ мм и шихтованной станиной полюсы могут входить в единый блок с сердечником станины, либо привинчиваться к сердечнику. Рассчитывают крепления главных и добавочных полюсов по методике, изложенной в [2, 15].

§ 3-15. Обмотки главных и добавочных полюсов. Компенсационная обмотка

В машинах с $h \leqslant 200$ мм целесообразно изолировать сердечники полюсов полимерными пленками, образуемыми методом напыления. Напыление производится в камере, в которой поступающая под давлением струи воздуха порошкообразная термореактивная смола (например, эпоксидная) осаждается на предварительно нагретой поверхности сердечника полюса, а затем затвердевает. Процесс протекает с образованием пленки толщиной около 1 мм. Пленка обладает высокими электроизоляционными свойствами и механической прочностью. Для дополнительного повышения надежности такой изоляции целесообразно перед напылением закруглять кромки неизолированного сердечника.

На каждом полюсе — главном или добавочном — располагают одну катушку; на главном полюсе может также дополнительно размещаться катушка последовательной стабилизирующей обмотки двигателя или компаундной обмотки генератора. Изоляция катушек полюсов состоит из тонкостенного каркаса, изготовляемого из лакотканеслюдопласта и стеклянной ленты. Конструкция изоляции обмотки приведена в приложении 31.

В бо́льших машинах с $h=225 \div 315$ мм катушки параллельной обмотки главных полюсов изготовляют в виде одной шайбы или для увеличения поверхности охлаждения из двух шайб на полюсе, между которыми для образования дистанции располагают металлическую скобу; на полюсе может также располагаться при необходимости дополнительная последовательная обмотка возбуждения. Изоляция катушек параллельной и последовательной обмоток состоит из изоляционного каркаса толщиной 2 мм и стеклоленты. Катушки добавочных полюсов в таких машинах выполняют из неизолированной шинной меди, гнутой на ребро. Материалом для изоляционных прокладок между витками катушек служит асбестовая бумага, пропитанная изоляционным лаком (при классах нагревостойкости изоляции B и F) или фенилоновая бумага (при классе H).

Конструкция изоляции катушек параллельной (или независимой) обмотки главных полюсов, состоящих из двух шайб, и последовательной стабилизирующей обмотки двигателей или компаундной обмотки генераторов, а также катушек обмотки добавочных полюсов приведена в приложении 32. Конструкция изоляции параллельной (или независимой) обмотки главных по-

люсов, состоящей из одной катушки на полюсе, показана на рис. 3-5.

У машин, работающих в тяжелых условиях ($h \geqslant 355$ мм), применяют обмотки полюсов повышенной надежности. Изоляционные каркасы обмотки главных полюсов, а также крепежные детали имеют увеличенную толщину. Катушки главных полюсов в этих машинах также обладают развитой поверхностью охлаждения за счет выполнения их из отдельных (двух или трех) шайб. Обмотку добавочных полюсов выполняют из неизолированной меди, гнутой на ребро, а катушки крепят к полюсу металлическими хомутами. Конструкция изоляции обмоток повышенной надежности приведена в приложении 33.

Марки пропиточных лаков и способы пропитки обмоток полюсов такие же, как указанные в § 3-13 для обмоток статоров. При применении изоляции «Монолит» (см. § 3-6) насаженные на сердечники полюсов изолированные катушки подвергают вакуумной пропитке термореактивным компаундом таким образом, что образуется единый монолитный блок полюс-катушка. При такой конструкции изоляции значительно улучшается теплоотдача катушек, а пропитка блоков полюс-катушка создает настолько прочное сцепление обмотки с сердечником полюса, что отпадает необходимость в применении крепящих деталей, в том числе металлических и изоляционных рамок. При применении изоляции «Монолит» температура обмотки значительно понижается (см. § 10-16).

Компенсационная обмотка. Компенсационная обмотка располагается в пазах наконечников главных полюсов. При стержневой обмотке пазы прямоугольные полузакрытые. Стержни изготовляют из неизолированной меди, изолируют, а затем вставляют в пазы с торца. Соединяют стержни медными дугами с помощью пайки; для выдерживания определенной дистанции (5—6 мм) между дугами устанавливают прокладки из стеклотекстолита, закрепляемые бандажами. Конструкция изоляции стержней компенсационной обмотки приведена в приложении 34.

При секционной обмотке пазы прямоугольные открытые, секции крепят клиньями. Секционную обмотку выполняют, как и стержневую, из неизолированных проводов. Секции изготовляют намоткой на шаблонах с последующим изолированием. Конструкция изоляции секционной обмотки приведена в приложении 35.

§ 3-16. Выводное устройство

Выводное устройство машины состоит из закрытой коробки выводов с расположенными в ней доской зажимов или изоляторами. У асинхронных двигателей коробка выводов снабжается соответствующим приспособлением для крепления подводимых проводов — 1—2 штуцерами или муфтой.

У асинхронных двигателей с $h = 56 \div 250$ мм и у машин постоянного тока с $h = 80 \div 200$ мм коробку выводов обычно располагают сверху станины, в машинах с бо́льшими значениями h —

сбоку станины. Коробка выводов, размещаемая наверху асинхронных двигателей с $h=56\div132$ мм, допускает поворот с фиксацией положения через 90°, а у двигателей с $h=160\div250$ мм — через 180°. У синхронных машин коробку выводов располагают сбоку станины. Степень защиты коробки выводов должна соответствовать степени защиты машины.

Общие виды машин с продольными и поперечными разрезами приведены на рис. 3-2, 3-3 и 3-4 (асинхронных двигателей), на рис. 3-5, 3-6, 3-7 (машин постоянного тока), на рис. 3-8 и 3-9 (синхронных машин).

Глава 4

ПОТЕРИ И КПД

§ 4-1. Подразделение потерь

Преобразование электрической энергии в механическую в электродвигателях и механической в электрическую в генераторах сопровождается рассеянием части подведенной энергии, т. е. потерями.

В электрических машинах различают основные и добавочные потери. *Основные потери* возникают в результате электромагнитных и механических процессов, которые определяют работу машины. К основным потерям относятся электрические потери в обмотках, электрические потери в переходных контактах щеток на коллекторе и кольцах, магнитные потери от основного потока в стальных сердечниках, механические потери. *Добавочные потери* возникают в результате вторичных процессов электромагнитного характера, например вследствие пульсации магнитного потока в воздушном зазоре, из-за наличия высших гармонических в кривых МДС статора и ротора, из-за потоков рассеяния обмоток и т. п.

Потери в обмотках. Электрические потери в обмотках (кроме параллельной обмотки возбуждения машин постоянного тока) вычисляют по току и сопротивлению обмотки постоянному току. Учитывая, что температура обмоток отдельных (даже однотипных) электрических машин при их работе в номинальном режиме не совпадает между собой (их температура, как правило, ниже допустимых предельных значений для примененного класса изоляции), при определении потерь, а также при уточнении магнитного потока и при расчете рабочих характеристик сопротивление обмоток приводят к стандартной рабочей температуре, установленной ГОСТ 183—74: 75°С — для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости В и 115°С — классов F и H. Соответственно сопротивление обмоток, рассчитанное для температуры 20°С, умножают на коэффициент $m_т$:

Класс нагревостойкости изоляции	B	F, H
Значение коэффициента $m_т$	$1+0{,}004(75-20)=1{,}22$	$1+0{,}004(115-20)=1{,}38$

Потери в параллельной обмотке возбуждения определяют по току и напряжению возбуждения.

Потери в переходных контактах щеток. Эти потери вычисляют по току и переходному падению напряжения в щетках обеих полярностей; оно находится в зависимости от марки щеток: у графитовых и электрографитированных — в пределах 1,4—2,4 В, а у металлографитных — 0,2—1,1 В. При расчете потерь падение напряжения условно принимают не зависящим от тока и равным 2 В для графитных и электрографитированных щеток и 0,6 В — для металлографитных щеток.

Потери в стальных сердечниках. Основные магнитные потери в стальных сердечниках электрических машин, вызываемые основным магнитным потоком машины, возникают в частях сердечников, подверженных перемагничиванию — в статоре (в зубцах и спинке) машин переменного тока и в якоре (в зубцах и спинке) машин постоянного тока. Потерями в стали сердечников ротора асинхронного двигателя пренебрегают вследствие малой частоты перемагничивания при номинальном режиме работы и соответственно незначительных потерь.

Потери в стали состоят из потерь от гистерезиса, пропорциональных частоте перемагничивания в первой степени, и потерь от вихревых токов, пропорциональных частоте перемагничивания во второй степени. Зависимость суммарных потерь от частоты перемагничивания выражается степенной функцией, показатель которой зависит от свойств стали (ее марки). Потери в стали, кроме того, пропорциональны удельным магнитным потерям $p_{1,0/50}$, установленным ГОСТ 21427.2—75, массе рассматриваемой части магнитопровода m и квадрату магнитной индукции B^2. Таким образом, потери в рассматриваемой части стальных сердечников

$$P_c = Kp_{1,0/50}(f/50)^{\beta}B^2m. \qquad (4\text{-}1)$$

Здесь K — поправочный коэффициент, учитывающий увеличение потерь в зубцах и в спинке сердечника из-за резки, штамповки и сборки листов, опрессовки, опиловки и обточки сердечников, а также из-за неравномерного распределения магнитной индукции. Значение коэффициента K зависит от качества штампов и совершенства технологического процесса изготовления сердечников (среднее значение K, установленное опытным путем, составляет 1,7 для машин переменного тока и 2,3 для машин постоянного тока).

Значения удельных магнитных потерь $p_{1,0/50}$, регламентированных ГОСТом, в состоянии поставки и показателя степени β для разных марок холоднокатаной электротехнической стали при толщине листов 0,5 мм приведены ниже:

Марка стали	2013,	2312,	2411
$p_{1,0/50}$, Вт/кг	2,5,	1,75,	1,6
β	1,5,	1,4,	1,3

Примечание: удельные потери для других марок изотропной холоднокатаной стали приведены в ГОСТ 21427.2—75.

Механические потери. Эти потери состоят из потерь на трение в подшипниках, трения щеток на коллекторе или контактных кольцах, трения ротора или якоря о воздух и потерь на вентиляцию машины.

Потери на трение щеток зависят от коэффициента трения щеток о коллектор или контактные кольца $k_{тр}$, удельного давления пружины на щетку $p_{щ}$, площади поверхности щеток в контакте $S_{щ\Sigma}$ и окружной линейной скорости коллектора или контактных колец $v_к$.

Потери на трение в подшипниках, трение ротора или якоря о воздух и потери на вентиляцию машины точно рассчитать затруднительно; для их приближенного определения обычно пользуются эмпирическими зависимостями, составленными на основе многочисленных испытаний изготовленных машин. Такие зависимости приведены для машин переменного тока в § 9-9, 11-11 и для машин постоянного тока — в § 10-13.

Добавочные потери. Классификация видов добавочных потерь велика. Более значительными из этих потерь являются: — у асинхронных двигателей — потери на поверхности ротора от зубцовых гармонических МДС статора и при х. х., вызванные зубчатым строением статора; потери в обмотке статора от вихревых токов, наводимых собственным потоком рассеяния; у машин постоянного тока — потери на поверхности полюсов от пульсации потока в зазоре, вызванной зубчатым строением якоря; потери в обмотке якоря от поперечной составляющей поля в зазоре на х. х. и потери, связанные с процессом коммутации; у синхронных машин — потери на поверхности полюсов и в демпферной обмотке, вызванные высшими гармоническими и зубцовыми гармоническими МДС статора; потери в зубцах и спинке статора от третьей гармонической МДС ротора; потери в обмотке статора от вихревых токов, наводимых собственным потоком рассеяния.

Методика расчета отдельных видов добавочных потерь подробно освещена в [16].

Согласно ГОСТ 1828—75 при определении КПД добавочные потери при нагрузке у всех электрических машин, кроме синхронных мощностью свыше 100 кВ·А, учитывают приближенно в процентах от отдаваемой мощности для генераторов и от подводимой мощности для двигателей, как указано ниже:

Машины постоянного тока:	
некомпенсированные	1,0
компенсированные	0,5
Асинхронные двигатели	0,5
Синхронные машины мощностью до 100 кВ·А	0,5

Указанные значения добавочных потерь относятся к номинальной мощности электрических машин; при мощности, отличающейся от номинальной, эти значения добавочных потерь пересчитывают пропорционально квадрату тока рабочей цепи машины.

Для двигателей постоянного тока с широким регулированием частоты вращения за счет ослабления магнитного поля добавочные потери при номинальной частоте вращения определяют, как указано выше, а при других частотах вращения добавочные потери пересчитывают умножением на коэффициент, зависящий от отношения данной частоты вращения к ее номинальному значению:

Отношение частоты вращения	1,5	2,0	3,0	4,0
Коэффициент	1,4	1,7	2,5	3,2

При расчете синхронных машин мощностью свыше 100 кВ·А добавочные потери предварительно определяют таким же методом, как для машин мощностью до 100 кВ·А, а при испытании машин — в соответствии с ГОСТ 10169—62.

§ 4-2. Определение КПД и нагрузки, соответствующей максимальному КПД

Коэффициент полезного действия машины (о. е.)

$$\eta = P_2/P_1 = (P_1 - P_\Sigma)/P_1 = 1 - P_\Sigma/P_1, \qquad (4\text{-}2)$$

где P_1 — подводимая мощность; P_Σ — сумма потерь в машине (мощность и потери малых машин могут выражаться в Вт, а больших — в кВт).

При изменении нагрузки машины меняется ее КПД. Определим условия, соответствующие максимальному КПД любой машины. Потери в электрической машине можно подразделить на постоянные и переменные. К *постоянным потерям* $P_{пост}$, практически не зависящим от нагрузки, относятся потери в стальных сердечниках, механические потери и потери в цепи возбуждения (синхронной машины и машины постоянного тока). *Переменными потерями* $P_{пер1}$, зависящими от тока нагрузки в первой степени, являются потери в контактах щеток. К *переменным потерям* $P_{пер2}$, зависящим от тока нагрузки во второй степени, относятся потери в обмотках (кроме обмотки возбуждения), а также добавочные потери.

На примере работы машины в режиме генератора связь КПД с составляющими потерь выражается следующим образом:

$$\eta = 1 - P_\Sigma/P_1 = 1 - (P_{пост} + P_{пер1} + P_{пер2})/(P_2 + P_{пост} + P_{пер1} + P_{пер2}) = 1 - (P_{пост} + AI + BI^2)/(UI + P_{пост} + AI + BI^2), \qquad (4\text{-}3)$$

где A и B — коэффициенты пропорциональности.

Взяв производную от (4-3) по току, определим условие, при котором КПД имеет максимальное значение:

$$P_{пост} = BI^2 = P_{пер2}. \qquad (4\text{-}4)$$

Следовательно, максимальному значению КПД соответствует такая нагрузка, при которой переменные потери, пропорциональные I^2, будут равны постоянным потерям машины. Это условие относится также и к работе машины в режиме двигателя.

Учитывая, что асинхронные двигатели в зависимости от мощности и вида привода работают в среднем при 0,5—0,6 номинальной мощности, а машины постоянного тока и синхронные машины — при 0,6—0,7 номинальной мощности, их целесообразно проектировать так, чтобы КПД достигал максимального или близкого к нему значения при указанных нагрузках.

Глава 5

ТЕПЛОВОЙ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТЫ

§ 5-1. Общие положения

После выполнения электромагнитных расчетов машины необходимо провести тепловой расчет для определения ожидаемого установившегося превышения температуры обмоток и коллектора (у машины постоянного тока) при продолжительном режиме работы ($S1$).

Распределение температуры в обмотках электрических машин не равномерно, а измерение методом сопротивления или термометра не дает возможность определить температуру в наиболее горячей точке обмотки. Поэтому пределы температуры в обмотках, допускаемые по ГОСТ 183—74, ниже регламентированных в СТ СЭВ 782—77 на изоляционные материалы *:

Класс нагревостойкости изоляции	B	F	H
Предельно допускаемые температуры, °С:			
изоляционных материалов (СТ СЭВ 782—77)	130	155	180
обмоток машин (ГОСТ 183—74)	120	140	165
Предельно допускаемые превышения температуры обмоток машин, °С	80	100	125

Тепловой расчет обмоток производят, исходя из наиболее неблагоприятных условий, для чего потери в обмотках рассчитывают, исходя из сопротивлений обмоток, приведенных к максимально допускаемой температуре при выбранном классе нагревостойкости изоляции (за исключением обмоток возбуждения машин постоянного и переменного тока). Для этого сопротивления обмоток, рассчитанные для температуры 20 °С, умножают на коэффициент $m'_т$:

Класс нагревостойкости изоляции	B	F	H
Значение коэффициента $m'_т$	$1+0,004(120-20)=1,4$	$1+0,004(140-20)=1,48$	$1+0,004(165-20)=1,58$

* Допускаемые превышения температуры обмоток указаны при температуре охлаждающей среды 40 °С и при измерении методом сопротивления.

Для однорядных обмоток возбуждения с неизолированными поверхностями допускаемые температуры и превышения температуры на 10 °С выше.

Для коллекторов и контактных колец предельно допускаемые превышения температуры при измерении методом термометра составляют для класса нагревостойкости изоляции B—80 °С, для класса F—90 °С и для класса H—100 °С.

§ 5-2. Теплоотдача и теплопередача

Возникающие в машине потери выделяются в виде теплоты и передаются охлаждающей среде (воздух, масло, вода, водород, гелий и т. п.) через поверхность отдельных частей непосредственно или через другие граничащие с ними части машин. В машинах общего назначения, проектирование которых рассматривается в данной книге, охлаждающей средой является воздух.

Передаваемый через поверхность тепловой поток (Вт)

$$P_п = \alpha_п \Delta t_п S_п, \tag{5-1}$$

где $\alpha_п$ — коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/(мм^2·град); $\Delta t_п$ — превышение температуры поверхности над температурой охлаждающего воздуха, °C; $S_п$ — площадь поверхности охлаждения, мм^2.

По аналогии с электрической цепью представим (5-1) в виде

$$\Delta t_п = P_п R_п, \tag{5-2}$$

где $R_п = 1/(\alpha_п S_п)$.

Здесь падению напряжения соответствует превышение (перепад) температуры $\Delta t_п$, току — потери (тепловой поток) $P_п$, сопротивлению электрической цепи — тепловое сопротивление $R_п$.

По пути к охлаждаемой поверхности тепловой поток встречает дополнительное тепловое сопротивление в изоляции и в металлах. При тепловом расчете учитывают только тепловое сопротивление изоляционных материалов, обладающих малым коэффициентом теплопроводности; тепловым сопротивлением металлов (медь, сталь, чугун) пренебрегают ввиду их высокой теплопроводности. Тепловой поток (Вт), протекающий через изоляцию,

$$P_и = \lambda_и \Delta t_и S_и / \delta_и, \tag{5-3}$$

где $\lambda_и$ — коэффициент теплопроводности изоляционного материала, Вт/(мм·град); $\Delta t_и$ — перепад температуры в изоляции, °C; $S_и$ — площадь односторонней поверхности изоляции, мм^2; $\delta_и$ — толщина изоляции, мм.

Уравнение (5-3) представим в следующем виде:

$$\Delta t_и = P_и R_и, \tag{5-4}$$

где $R_и = \delta_и / (\lambda_и S_и)$.

Потери в машине, передаваемые охлаждаемому воздуху внутри машины, подогревают проточный воздух в защищенной машине или воздух в замкнутом объеме в закрытой машине.

Тепловой поток (Вт), передаваемый воздуху внутри машины,

$$P_\Sigma = \alpha_в \Delta t_в S_в, \tag{5-5}$$

где $\alpha_в$ — коэффициент подогрева воздуха, Вт/(мм^2·град); $\Delta t_в$ — среднее превышение температуры воздуха внутри машины, °C; $S_в$ — условная поверхность охлаждения машины, мм^2.

Уравнение (5-5) представим в следующем виде:

$$\Delta t_в = P_\Sigma R_в. \tag{5-6}$$

У закрытых машин все потери (кроме потерь в наружном вентиляторе) передаются изнутри машины наружному охлаждающему воздуху. При этом тепловое сопротивление $R_в$ должно включать в себя тепловое сопротивление поверхности машины наружному охлаждающему воздуху.

§ 5-3. Методы теплового расчета

Метод экспериментального моделирования. Применяется в тех случаях, когда проектируемая электрическая машина не имеет схожих в тепловом отношении аналогов. Для получения требуемых при расчете параметров необходимо проведение экспериментов на моделях или на макетах. Для определения искомых превышений температур отдельных частей электрических машин находят перепады температур, происходящие на пути движения тепловых потоков от источников теплоты к охлаждающей среде. Перепады температур происходят в изоляции, в активных частях, а также между охлаждающими поверхностями машины и охлаждаемой средой. Кроме того, необходимо учитывать подогрев охлаждающей среды от нагретой машины.

Температурный перепад в изоляции может быть определен по (5-3). Изоляцию обычно выполняют из нескольких слоев. Тепловое сопротивление многослойной изоляции равно сумме тепловых сопротивлений ее n слоев, включая воздушные промежутки. Для расчета теплового сопротивления изоляции, состоящей из n слоев, необходимо знать ее эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{экв}$, который определяется экспериментально на соответствующих макетах обмоток.

Теплопередача с поверхности обычно происходит тремя путями: лучеиспусканием, теплопроводностью и конвективной теплопередачей. Первые два пути менее эффективны, чем конвективная теплопередача, поэтому ими можно пренебречь.

Температурный перепад на охлаждаемой поверхности может быть определен по (5-1). Коэффициент теплоотдачи поверхности $\lambda_п$ определяют экспериментально на моделях. Чтобы экспериментальные данные можно было использовать для широкого класса охлаждаемых поверхностей, их обычно выражают с помощью безразмерных чисел (критериев). Одним из них является число Нуссельта Nu, которое связывает коэффициент теплоотдачи $\alpha_п$ нагретой поверхности с коэффициентом теплопроводности λ охлаждающей среды, движущейся относительно этой поверхности:

$$Nu = \alpha_п d_1 / \lambda, \tag{5-7}$$

где d_1 — параметр, характеризующий геометрию исследуемой поверхности охлаждения.

Этот параметр для канала круглого сечения является диаметром сечения d_1; для каналов поперечного сечения произвольной формы

$$d_1 = 4S/П, \tag{5-8}$$

где S и Π — соответственно площадь и периметр поперечного сечения канала;

для канала прямоугольного сечения со сторонами b и h

$$d_1=2bh/(b+h); \qquad (5\text{-}9)$$

для каналов узких прямоугольных ($h \gg b$)

$$d_1 \approx 2b; \qquad (5\text{-}10)$$

для охлаждаемых открытых поверхностей d_1 принимается равным длине или высоте охлаждаемой поверхности.

Другим безразмерным критерием является число Рейнольдса Re, определяющее характер движения охлаждающей среды, обладающей кинематической вязкостью ν и движущейся со скоростью v:

$$\mathrm{Re}=vd_1/\nu. \qquad (5\text{-}11)$$

Свойства охлаждающей среды могут быть охарактеризованы числом Прандтля

$$\mathrm{Pr}=\nu/a, \qquad (5\text{-}12)$$

где

$$a=\lambda/(C_p\rho) \qquad (5\text{-}13)$$

— температуропроводность, м²/с; C_p — удельная теплоемкость окружающей среды при постоянном давлении, Дж/(°С·кг); ρ — плотность окружающей среды, кг/м³.

Для наиболее часто применяемой в электромашиностроении охлаждающей среды — воздуха в табл. 5-1 приведены его физические параметры при $p=0{,}1$ МПа (см. [20]).

Таблица 5-1

Температура, °С	Параметры				
	λ, Вт/(°С·м)	ρ, кг/м³	$\nu\cdot10^{-8}$, м²/с	C_p, Дж/(°С·кг)	$a\cdot10^{-8}$, м²/с
20	0,0252	1,164	1568	1015	2123
30	0,0258	1,127	1660	1015	2260
40	0,0266	1,092	1752	1020	2394
50	0,0272	1,057	1847	1020	2536
60	0,02795	1,020	1943	1020	2678
70	0,0286	0,996	2045	1020	2827

Значения $\mathrm{Re}<1{,}5\cdot10^5$ соответствуют ламинарному течению частиц воздуха. Для этого случая критериальное уравнение теплообмена (см. [13]) имеет вид

$$\mathrm{Nu}=0{,}594\mathrm{Re}^{0,5}. \qquad (5\text{-}14)$$

Значения $\mathrm{Re}>5\cdot10^5$ соответствуют турбулентному течению частиц воздуха. В этом случае

$$\mathrm{Nu}=0{,}043\mathrm{Re}^{0,75}. \qquad (5\text{-}15)$$

Из (5-7), (5-11), (5-14) и (5-15) можно найти коэффициент теплоотдачи поверхности нагретой стенки, обдуваемой воздухом вдоль ее длины l: для ламинарного течения

$$\alpha_{п}=0{,}594\lambda l^{-0,5}(v/\nu)^{0,5}\cdot 10^{-4}; \qquad (5\text{-}16)$$

для турбулентного течения

$$\alpha_{п}=0{,}0432\lambda l^{-0,22}(v/\nu)^{0,78}\cdot 10^{-4}. \qquad (5\text{-}17)$$

Значения λ и ν выбирают из табл. 5-1 для средней температуры воздуха

$$t_{ср}=(t_{н}-t_{о})/2, \qquad (5\text{-}18)$$

где $t_{о}$ и $t_{н}$ — соответственно температура холодного и нагретого воздуха.

При принудительном движении охлаждающей среды в канале машины и ламинарном течении $Re<2300$, а при турбулентном — $Re>10\,000$.

Для турбулентного течения (см. [13])

$$Nu=0{,}32\,Re^{0,8}Pr^{0,37}\,(l/d_1)^{-0,05}. \qquad (5\text{-}19)$$

Коэффициент теплоотдачи для стенки канала [Вт/(град·см²)]

$$\alpha_{п}=0{,}027\lambda a^{-0,78}d_1^{-0,22}v^{0,78}\cdot 10^{-4}. \qquad (5\text{-}20)$$

Расчет коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{п}$ для стенки канала не всегда дает хорошее совпадение с опытными данными, поэтому предпочтительнее определять $\alpha_{п}$ экспериментально. Определив экспериментально коэффициент теплоотдачи для охлаждаемой поверхности $\alpha_{п}$, можно рассчитать по (5-1) температурный перепад на этой поверхности.

Искомая средняя установившаяся температура обмотки электрической машины

$$\Delta t=\Delta t_{и}+\Delta t_{п}+\Delta t_{в}+t_{о}, \qquad (5\text{-}21)$$

где $\Delta t_{и}$, $\Delta t_{п}$ — перепады температур в изоляции и на охлаждаемой поверхности соответственно; $\Delta t_{в}$ — среднее превышение температуры воздуха; $t_{о}$ — температура окружающей среды.

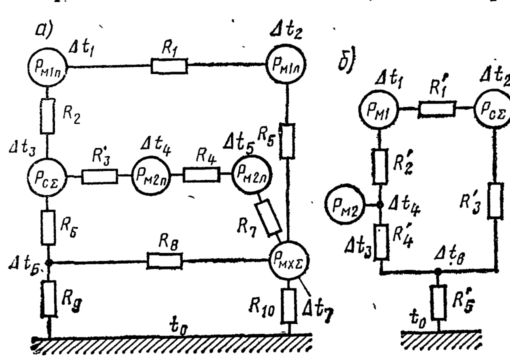


Рис. 5-1. Тепловая (*а*) и упрощенная тепловая (*б*) схемы замещения асинхронного короткозамкнутого двигателя закрытого обдуваемого исполнения (степень защиты IP44)

Метод расчета с помощью тепловых схем замещения. Тепловые процессы в электрических машинах могут быть представлены по аналогии с электрическими цепями тепловых схем замещения. Уравнения (5-2) и (5-4) показывают связи, характерные для каждой части тепловой схемы замещения: перепад темпе-

ратуры Δt равен произведению теплового потока P на тепловое сопротивление R. Использование тепловых схем замещения позволяет определять среднюю температуру частей электрической машины, принимамых за однородные тела.

На рис. 5-1,*а* представлена для примера тепловая схема замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором закрытого обдуваемого исполнения (степень защиты IP44). Кружками на схеме показаны источники теплоты, а прямоугольниками — тепловые сопротивления между источниками теплоты или узлами теплопроводности.

Используя закон теплопроводности Фурье, из уравнений теплового баланса для каждого источника теплоты и каждого узла можно составить число уравнений, равное числу искомых превышений температуры $\Delta t_1 — \Delta t_7$:

$$\left.\begin{aligned}
&(\Delta t_1 - \Delta t_2)/R_1 + (\Delta t_1 - \Delta t_3)/R_2 = P_{\text{м1п}};\\
&(\Delta t_2 - \Delta t_1)/R_1 + (\Delta t_2 - \Delta t_7)/R_5 = P_{\text{м1л}}.\\
&(\Delta t_3 - \Delta t_1)/R_2 + (\Delta t_3 - \Delta t_4)/R_3 + (\Delta t_3 - \Delta t_6)/R_6 = P_{\text{c}\Sigma};\\
&(\Delta t_4 - \Delta t_3)/R_4 + (\Delta t_4 - \Delta t_5)/R_4 = P_{\text{м2п}};\\
&(\Delta t_5 - \Delta t_4)/R_4 + (\Delta t_5 - \Delta t_7)/R_7 = P_{\text{м2л}};\\
&\Delta t_6/R_9 + (\Delta t_6 - \Delta t_3)/R_6 + (\Delta t_6 - \Delta t_7)/R_8 = 0;\\
&\Delta t_7/R_{10} + (\Delta t_7 - \Delta t_2)/R_5 + (\Delta t_7 - \Delta t_5)/R_7 + (\Delta t_7 - \Delta t_6)/R_8 = P_{\text{мх}\Sigma}.
\end{aligned}\right\} \quad (5\text{-}22)$$

Здесь $P_{\text{м1п}}$ и $P_{\text{м1л}}$ — потери в обмотке статора соответственно в активной и лобовых частях обмотки; $P_{\text{c}\Sigma}$ — потери в стали сердечника статора; $P_{\text{м2п}}$ и $P_{\text{м2л}}$ — потери в обмотке ротора соответственно в активной и лобовых частях обмотки; $P_{\text{мх}\Sigma}$ — потери механические; $R_1 — R_{10}$ — тепловые сопротивления.

В связи со сложностью решения этой системы уравнений с семью неизвестными часто идут на упрощение схемы, неизбежно теряя при этом в точности расчета. Так, тепловую схему замещения, представленную на рис. 5-1,*а*, можно упростить (рис. 5-1,*б*),

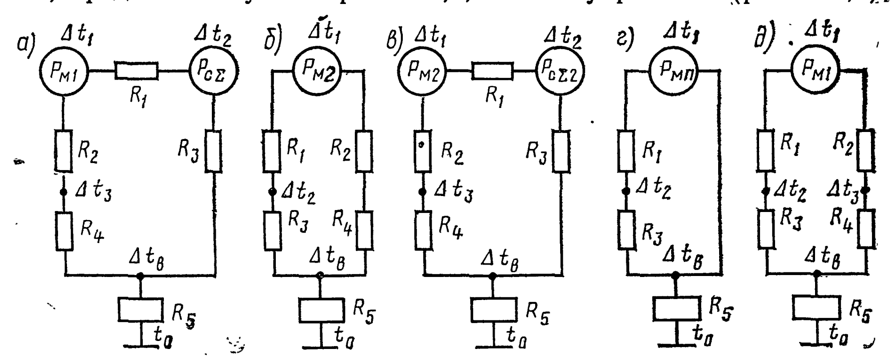


Рис. 5-2. Тепловые схемы замещения статора машины переменного тока (*а*), фазного ротора асинхронного двигателя (*б*), якоря машины постоянного тока (*в*), обмоток возбуждения синхронной машины и машины постоянного тока (*г*), компенсационной обмотки машины постоянного тока (*д*)

приняв ряд упрощающих допущений. Упрощения производятся за счет объединения источников теплоты, совмещения узлов теплопроводности и разрыва контуров.

Если имеется возможность пренебречь действием тепловых потоков одних узлов электрической машины на другие, то могут быть составлены тепловые схемы замещения и для отдельных узлов электрических машин. Ниже будут приведены схемы замещения для статора машины переменного тока, фазного ротора, якоря машины постоянного тока, для обмоток возбуждения машины постоянного тока и синхронной, а также для компенсационной обмотки машины постоянного тока.

В статоре машины переменного тока (рис. 5-2,*а*) потери, возникающие в активной части обмотки статора, передаются сердечнику, преодолевая тепловое сопротивление R_1 изоляции проводов, катушек и паза; при этом в изоляции создается перепад температуры $\Delta t_и$. Эти потери, а также потери, возникающие в стали сердечника, передаются охлаждаемой поверхностью сердечника и вентиляционных каналов (при их наличии) воздуху внутри машины, преодолевая при передаче тепловое сопротивление R_3; при этом создается превышение температуры поверхности активной части статора над температурой воздуха внутри машины $\Delta t_п$. Потери, возникающие в лобовых частях обмотки статора, передаются через изоляцию проводов и катушек, преодолевая тепловое сопротивление изоляции R_2; при этом в изоляции создается перепад температуры $\Delta t_{и.л}$. Затем указанные потери передаются охлаждаемой поверхностью лобовых частей воздуху внутри машины, преодолевая при передаче тепловое сопротивление R_4 и создавая при этом превышение температуры поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины $\Delta t_л$.

Потери, возникающие внутри машины, передаются через станину и подшипниковые щиты охлаждающему воздуху, преодолевая при этом тепловое сопротивление R_5 и создавая превышение температуры воздуха внутри машины над температурой наружного охлаждающего воздуха $\Delta t_в$.

Тепловая схема замещения фазного ротора асинхронного двигателя (рис. 5-2,*б*) отличается от тепловой схемы замещения статора отсутствием в ней источника потерь в стали сердечника ротора, которыми пренебрегают из-за их незначительной величины при номинальной частоте вращения. Тепловая схема замещения якоря машины постоянного тока (рис. 5-2,*в*) аналогична тепловой схеме замещения статора машины переменного тока. Тепловая схема замещения обмоток возбуждения синхронных машин и машин постоянного тока приведена на рис. 5-2,*г*.

Основная часть потерь в обмотке возбуждения синхронной машины и в обмотках возбуждения главных и добавочных полюсов машины постоянного тока передается наружной поверхности катушек, преодолевая тепловое сопротивление R_1 изоляции проводов и катушек; при этом в изоляции создается перепад температуры $\Delta t_и$. Затем потери передаются охлаждаемой поверхностью катушек

воздуху внутри машины, преодолевая при передаче тепловое сопротивление R_3; при этом создается превышение температуры поверхности катушек над температурой воздуха внутри машины $\Delta t_п$. Далее потери, преодолевая тепловое сопротивление R_5 между воздухом внутри машины и наружным охлаждающим, создают превышение температуры $\Delta t_в$.

Тепловая схема замещения компенсационной обмотки приведена на рис. 5-2,*д*. Потери в этой обмотке передаются сердечникам полюсов, преодолевая тепловое сопротивление R_1 изоляции проводов, секции и паза; при этом в изоляции создается перепад температуры $\Delta t_и$. Затем основная часть этих потерь передается охлаждаемой поверхностью сердечников воздуху внутри машины, преодолевая при передаче тепловое сопротивление R_3; при этом создается превышение температуры поверхности сердечников полюсов над температурой воздуха внутри машины $\Delta t_п$. Потери, возникающие в лобовых частях секционной компенсационной обмотки, передаются через изоляцию проводов и секций, преодолевая тепловое сопротивление R_2; при этом в изоляции создается перепад температуры $\Delta t_{и.л}$. Затем указанные потери передаются охлаждаемой поверхностью лобовых частей воздуху внутри машины, преодолевая тепловое сопротивление R_4 и создавая при этом превышение температуры поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины $\Delta t_{п.л}$. При стержневой компенсационной обмотке потери в соединительных дугах передаются охлаждаемой поверхностью дуг непосредственно воздуху внутри машины, преодолевая тепловое сопротивление R_4. Далее потери преодолевают тепловое сопротивление R_5, создавая превышение температуры воздуха внутри машины над температурой охлаждающего воздуха $\Delta t_в$.

При использовании метода расчета, основанного на тепловых схемах замещения, наибольшую трудность представляет определение тепловых сопротивлений, входящих в схемы замещения. В [21] приведены формулы для расчета тепловых сопротивлений.

Метод эквивалентных греющих потерь. Этот метод основан на принципе суперпозиции (наложений превышений температуры, вызываемых каждым источником потерь) и применим для вентилируемых машин.

Для асинхронных машин основное уравнение этого метода имеет следующий вид (см. [35]):

$$\Delta t_{м1} = R_t (P_{м1} + k_с P_{с\Sigma} + k_{м2} P_{м2} + k_д P_{доб}), \qquad (5\text{-}23)$$

где $P_{м1}$, $P_{м2}$ — потери в обмотке статора и ротора; $P_{доб}$ — добавочные потери в машине; $k_с$, $k_{м2}$, $k_д$ — коэффициенты, характеризующие влияние на нагрев обмотки статора соответственно потерь в стали, обмотке ротора и добавочных.

Сумму, заключенную в скобки в (5-23), называют *греющими потерями*, а R_t — тепловым сопротивлением машины. Если проектируемая электрическая машина имеет близкие в тепловом отношении прототипы, то для последних экспериментально могут быть

определены тепловое сопротивление R_t и коэффициенты k_c, $k_{м2}$ и $k_д$. Эти коэффициенты могут быть также выражены в функции частоты вращения и основных размеров сердечников и корпусов двигателей (см. [35]). Метод греющих потерь очень удобен, если необходимо определить превышение температуры при проектировании модификации существующей машины, которая должна быть рассчитана на другую частоту вращения или на другие нагрузки.

Упрощенные методы теплового расчета. Методы расчета, основанные на экспериментальном моделировании или на тепловых схемах замещения, как правило, не дают желаемую высокую точность, хотя требуют значительных экспериментальных и расчетных усилий. Это вызвано рядом причин. Процессы теплообмена в электрических машинах сопровождаются сложным характером течения охлаждающего воздуха, связанным с его турбулентностью и вихреобразованием. Получение точных решений соответствующих уравнений движения охлаждающего воздуха затруднительно, но даже при наличии таковых расчет сложен и трудоемок. Кроме того, результаты расчета могут не совпадать с действительными температурами отдельных частей электрических машин вследствие влияния неоднородности слоистых изоляционных материалов, трудно учитываемых неизбежных воздушных включений, а также неизбежных, но допустимых технологических отклонений (например, в величине воздушного зазора между сердечником статора и корпусом машины). Поэтому во многих случаях проектирования вполне обосновано применение упрощенных методов теплового расчета, основанных на использовании коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи, полученных по результатам экспериментального исследования значительного количества подобных машин.

При составлении упрощенной методики теплового расчета принимают следующие допущения: 1) потери в обмотках и потери в стали сердечников статора, фазного ротора и якоря создают одинаковый греющий эффект; 2) потери в активной части сердечников отводятся их цилиндрической поверхностью, а потери в лобовых частях обмоток статора, фазного ротора и якоря отводятся цилиндрической поверхностью лобовых частей обмоток.

В настоящей книге для теплового расчета асинхронных двигателей, машин постоянного тока и синхронных рекомендованы и применены упрощенные методы теплового расчета. Порядок расчета по этой методике идентичен для всех видов рассматриваемых электрических машин: определяют площади поверхностей охлаждения и удельные тепловые потоки, приходящиеся на единицу этих площадей; затем, зная экспериментальные значения коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности, определяют искомые превышения температуры.

§ 5-4. Предварительная оценка ожидаемого нагрева обмоток статора и якоря

Ожидаемое превышение температуры обмоток статора или якоря в значительной мере определяется уровнем удельной тепло-

вой нагрузки статора или якоря от электрических потерь в обмотке. Согласно (1-6) у машин переменного тока линейная нагрузка статора (А/см)

$$A_1 = 20 m_1 w_1 I_1 / (\pi D_1). \tag{5-24}$$

Подставив в (5-24) с соответствующими преобразованиями значения I_1 из (9-39), w_1 из (9-178), учитывая, что потери в обмотке статора $P_{м1} = m_1 I^2{}_1 m_т r_1$ (здесь r_1 — сопротивление фазы обмотки статора при 20 °С), получим

$$A_1 J_1 = 114 \cdot 10^4 \ P_{м1} (m_т \pi D_1 l_{ср1}). \tag{5-25}$$

Принимая поверхность охлаждения обмотки статора пропорциональной произведению $\pi D_1 l_{ср1}$, легко заметить, что $A_1 J_1$ будет характеризовать удельную тепловую нагрузку статора от электрических потерь в его обмотке.

Согласно (1-20) у машин постоянного тока линейная нагрузка якоря (А/см)

$$A_2 = 20 \, w_2 I_2 / (\pi D_{н2} 2a). \tag{5-26}$$

Подставив в (5-26) с соответствующими преобразованиями значения I_2 из (10-52), w_2 из (10-58), учитывая, что потери в обмотке якоря $P_{м2} = I^2{}_2 m_т r_2$ (здесь r_2 — сопротивление обмотки якоря при 20 °С), получим

$$A_2 J_2 = 114 \cdot 10^4 P_{м2} / (m_т \pi D_{н2} l_{ср2}). \tag{5-27}$$

Принимая поверхность охлаждения обмотки якоря пропорциональной произведению $\pi D_{н2} l_{ср2}$, легко заметить, что $A_2 J_2$ будет характеризовать удельную тепловую нагрузку якоря от электрических потерь в его обмотке.

Уровень значений $A_1 J_1$ и $A_2 J_2$ в спроектированных машинах, определяемый при расчете обмоток статора или якоря, дает возможность предварительно оценить ожидаемое превышение температуры обмоток до проведения теплового расчета. Допускаемые значения $A_1 J_1$ и $A_2 J_2$ зависят от условий охлаждения машин и класса нагревостойкости изоляции; средние допускаемые значения $A_1 J_1$ приведены на рис. 9-8 и 11-12, а $A_2 J_2$ на рис. 10-22.

§ 5-5. Системы вентиляции

Потери, возникающие в электрических машинах при их работе, переходят в теплоту, которую необходимо отводить для того, чтобы температура активных частей не превысила допустимых пределов, указанных в ГОСТ 183—74. Как правило, для усиления отвода теплоты в машинах применяют искусственную вентиляцию, осуществляемую соответствующими устройствами, и только лишь в закрытых двигателях постоянного тока мощностью до 10—15 кВт, выпускаемых в небольших количествах, достаточным оказывается естественное охлаждение.

Искусственную вентиляцию подразделяют на *самовентиляцию*, при которой охлаждение осуществляется вентилятором, размещенным на валу машины (или другими вентилирующими устройства-

ми вращающейся части машины), и на *независимую вентиляцию* с подачей охлаждающего воздуха в машину вентилятором с приводом от отдельного двигателя.

Система самовентиляции может быть *радиальной* и *аксиальной*. У машин со степенями защиты IP23 или IP22 и способом охлаждения IC01 при радиальной вентиляции охлаждающий воздух засасывается через торцовые окна обоих подшипниковых щитов, отбрасывается в радиальном направлении, омывая активные части машины, и выбрасывается через боковые окна станины (рис. 5-3,*а*). Засасывание воздуха в машину и его выбрасывание

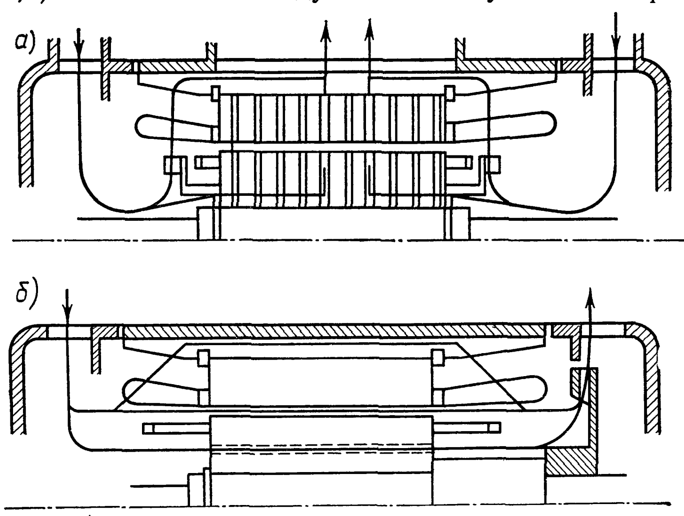


Рис. 5-3. Схемы двусторонней симметричной радиальной (*а*) и вытяжной аксиальной (*б*) вентиляции машин со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01

осуществляются с помощью лопаток ротора, а также его радиальных вентиляционных каналов (у сердечников длиной более 300 мм). Такая радиальная вентиляция называется *двусторонней, симметричной,* она обладает преимуществами в части простоты и технологичности конструкции, более низкого уровня шума и вентиляционных потерь, а охлаждающий эффект этой системы при частоте вращения 750 об/мин и ниже — не уступает действию аксиальной вентиляции. Двусторонняя симметричная радиальная вентиляция широко распространена в асинхронных двигателях и больших синхронных машинах (с $h>315$ мм).

При аксиальной вентиляции охлаждающий воздух засасывается через окна одного подшипникового щита, движется параллельно оси вала машины и выбрасывается через окна другого щита, расположенного со стороны выступающего конца вала (рис. 5-3,*б*); под этим же щитом на валу расположен вентилятор, засасывающий и выбрасывающий воздух. Такая аксиальная вентиляция именуется вытяжной; она хотя и сложнее радиальной, но обеспечи-

вает высокий теплосъем при частотах вращения более 750 об/мин. Для синхронных машин $h \leqslant 315$ мм и для машин постоянного тока вследствие ряда особенностей их конструкции предпочтительно применение вытяжной аксиальной вентиляции.

У машин со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 (рис. 5-4,*а*) внешняя поверхность станины обдувается вентилятором, расположенным на конце вала машины, противоположном выступающему концу. Вентилятор закрыт кожухом, направляющим охлаждающий воздух вдоль ребер или гладкой поверхности станины. У машин переменного тока большой мощности для

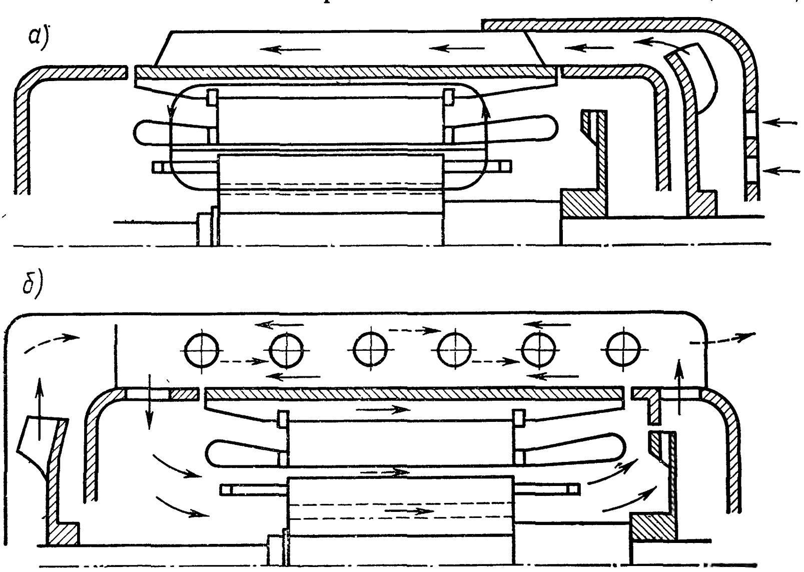


Рис. 5-4. Схемы вентиляции машин со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 (*а*) и IC0161 (*б*)

повышения эффекта охлаждения используют в роторе аксиальные каналы, через которые проходит наружный охлаждающий воздух («продуваемый» ротор). Вместо обдува наружной поверхности машины могут применяться воздухо-воздушные охладители: сосредоточенные пристроенные (рис. 5-4,*б* — способ охлаждения IC0161) и рассредоточенные в виде труб, вваренных по внешней окружности станины (способ охлаждения IC0151).

В двигателях постоянного тока применяют также независимую вентиляцию. У машин большой мощности независимая вентиляция осуществляется от постороннего источника с подводом воздуха по трубам (способ охлаждения IC17 или IC37). В машинах меньшей мощности распространено охлаждение от независимого электровентилятора, расположенного на общей оси в одном блоке с регулируемым двигателем. Такое исполнение в новых разработках используют для двигателей со степенью защиты как IP22 (способ охлаждения IC06), так и IP44 (способ охлаждения IC0641).

Главное преимущество независимой вентиляции — возможность регулирования частоты вращения двигателя вниз от номинальной при постоянном значении вращающего момента и улучшение энергетических показателей при регулировании частоты вращения вверх от номинальной.

§ 5-6. Требования к вентиляторам. Вентиляционный расчет

Для машин с аксиальной системой вентиляции применяют в основном центробежные вентиляторы с радиально расположенными лопатками, при которых производительность вентилятора не зависит от направления вращения машины (см. рис. 3-6).

При вращении центробежного вентилятора воздух, находящийся между лопатками, отбрасывается центробежной силой к периферии вентилятора, а затем выходит наружу. При этом у входных отверстий вентилятора создается разрежение, а на наружном диаметре вентилятора повышенное давление.

Для снижения вентиляционного шума и улучшения эффекта охлаждения у машин со степенью защиты IP22 или IP23 и способом охлаждения IC01 целесообразно наружный диаметр вентилятора выбирать меньше внутреннего диаметра станины на 10—20%, чтобы в месте выхода воздуха из вентилятора образовывалась камера расширения.

У асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23 и с радиальной системой вентиляции роль вентиляторов выполняют лопатки, отливаемые заодно с короткозамыкающими кольцами ротора (см. рис. 3-3), у двигателей с фазным ротором лопатки впаяны в хомутики, соединяющие концы стержней обмотки ротора, у синхронных машин вентиляционные лопатки укрепляют на катушках возбуждения индуктора (см. рис. 3-9).

Вентиляционный расчет. Вентиляционный расчет производят с целью определения расхода воздуха $V_в$, необходимого для охлаждения машины, и напора вентилятора H, обеспечивающего этот расход. Точный расчет вентиляционных систем электрических машин представляет сложную задачу, а различные отклонения размеров отдельных деталей и узлов (даже в пределах установленных допусков) влекут за собой несовпадение результатов испытания с расчетными данными. Поэтому далее излагаются применяемые на практике приближенные методы расчета вентиляции, базирующиеся на заводском опыте.

Необходимый расход воздуха у машин с аксиальной системой вентиляции, со степенью защиты IP22 или IP23 и способом охлаждения IC01 (м³/с)

$$V_в = P'_\Sigma / (c_в \Delta t'_в), \qquad (5\text{-}28)$$

где P'_Σ — потери, отводимые воздухом, проходящим через машину, Вт; $c_в = 1100$ — теплоемкость воздуха, Дж/(°С·м³); $\Delta t_в$ — превышение температуры выходящего из машины воздуха над вхо-

дящим ($\Delta t'_{в}=2\Delta t_{в}$), °C; $\Delta t_{в}$ — среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой наружного охлаждающего воздуха, °C.

Характеристика воздухопровода машины, выражающая связь напора (давления) вентилятора H и расхода воздуха $V_{в}$ в воздухопроводе, может быть приближенно выражена так:

$$H=ZV^2_{в}, \tag{5-29}$$

где $V_{в}$ — расход воздуха, м³/с; H — напор вентилятора, Па; Z — постоянная величина, зависящая от геометрических форм и размеров воздухопровода машины (по аналогии с электрической цепью Z называют эквивалентным аэродинамическим сопротивлением воздухопровода машины), Па·с²/м⁶.

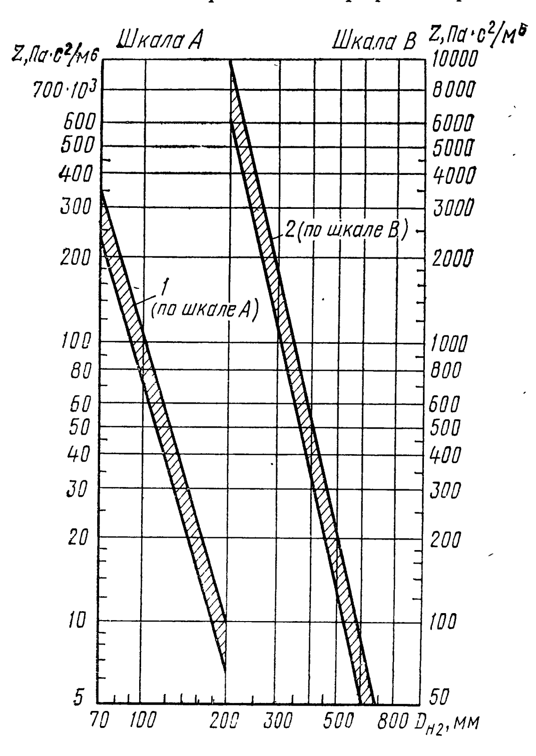


Рис. 5-5. Зоны средних значений $Z=f(D_{н2})$: *1* — якорь без аксиальных вентиляционных каналов (шкала *А*); *2* — якорь с аксиальными вентиляционными каналами (шкала *В*)

Вычисление Z может быть произведено согласно [15] или [21], однако точное определение Z затруднительно, так как цепь воздухопровода машины состоит из ряда участков, имеющих различные размеры и сложную конфигурацию. Величину Z в значительной мере определяют суммарные площади поперечного сечения отверстий (мм²) для входа $S_{вх}$ и выхода $S_{вых}$ воздуха из машин, которые целесообразно выбирать по следующим зависимостям:

$$S_{вх} \geqslant 3{,}3D^{1{,}65}_{н2}; \tag{5-30}$$

$$S_{вых} \geqslant 0{,}55D^{1{,}9}_{н2}. \tag{5-31}$$

На рис. 5-5 приведены зоны средних значений Z для машин с аксиальной системой вентиляции, составленные с учетом указанных рекомендаций по выбору $S_{вх}$ и $S_{вых}$ после исследования значительного количества машин.

Для центробежного вентилятора, у которого лопасти расположены радиально (здесь и далее рассматриваются только такие вентиляторы), характеристика вентилятора $H=f(V_{в})$ приближенно выражается зависимостью

$$H=H_0[1-(V_{в}/V_{в\,max})^2]. \tag{5-32}$$

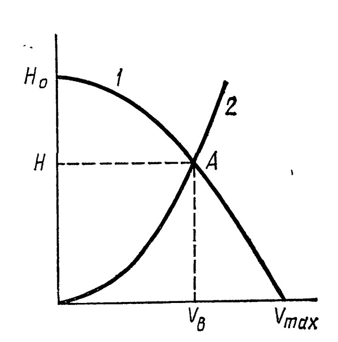


Рис. 5-6. Характеристики центробежного вентилятора (*1*) и воздухопровода машины (*2*)

Здесь H_0—напор вентилятора при $V_в=0$, т. е. при закрытых входных отверстиях машины (х. х. вентилятора); $V_{в\,max}$ — максимально возможное для вентилятора количество воздуха при $H=0$, т. е. при работе вентилятора непосредственно в окружающую среду (к. з. вентилятора). Значения H_0 и $V_{в\,max}$ зависят от размеров вентилятора.

Напор вентилятора (Па)

$$H_0=\eta_{а.о}\gamma\,(v^2_{вен2}-v^2_{вен1}), \qquad (5\text{-}33)$$

где $\eta_{а.о}=0{,}6$—аэродинамический КПД вентилятора при х. х.; $\gamma=1{,}23$ кг/м³—плотность воздуха.

Линейная скорость вентилятора (м/с) по наружному диаметру

$$v_{вен2}=\pi D_{вен2}n/(6\cdot 10^4); \qquad (5\text{-}34)$$

по внутреннему диаметру $D_{вен1}$

$$v_{вен1}=\pi D_{вен1}n/(6\cdot 10^4). \qquad (5\text{-}35)$$

Максимальный расход воздуха (м³/с)

$$V_{в\,max}\approx 0{,}42\,v_{вен2}\,S_{вен2}. \qquad (5\text{-}36)$$

Площадь поперечного сечения входных отверстий вентилятора (м²)

$$S_{вен}=0{,}92\,\pi\,D_{вен2}\,l_л\cdot 10^{-6}, \qquad (5\text{-}37)$$

где $l_л$ — длина лопатки, мм.

На рис. 5-6 представлены характеристики воздухопровода машины (*2*) и характеристика центробежного вентилятора (*1*). Точка пересечения этих характеристик *A* определяет действительный расход воздуха $V_в$ и напор вентилятора *H*. Значения $V_в$ и *H* можно также определить совместным решением уравнений (5-29) и (5-32). Тогда действительные расход воздуха (м³/с) и напор вентилятора (Па) соответственно будут

$$V_в=V_{в\,max}\sqrt{H_0/(H_0+ZV^2_{в\,max})};\quad H=H_0ZV^2_{в\,max}/(H_0+ZV^2_{в\,max}). \qquad (5\text{-}38)$$

Необходимый расход воздуха $V_в$ у машин со степенью защиты IP22 или IP23 и способом охлаждения IC01, при радиальной системе вентиляции также определяется по (5-28).

Приближенный расход (м³/с) воздуха может быть обеспечен радиальной вентиляцией, т. е.

$$V'_в\approx k_1(D_{н2}/100)^2\cdot 10^{-2}, \qquad (5\text{-}39)$$

где

$$k_1 = 3{,}5\sqrt[4]{(n_1/1000)^3}\,(n_к l_к + 100)/100 \qquad (5\text{-}40)$$

— коэффициент, зависящий от частоты вращения n_1.

Должно быть: $V'_в \geqslant V_в$.

Напор воздуха, развиваемый при радиальной системе,

$$H \approx 7{,}85\,(n_1/1000)^2\,(D_{н2}/100)^2. \qquad (5\text{-}41)$$

Необходимый расход воздуха у машин со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 (м³/с)

$$V_в = k_2 P'_\Sigma/(c_в\,\Delta t_в), \qquad (5\text{-}42)$$

где

$$k_2 = 2{,}2\sqrt[4]{(n_1/1000)^3}\sqrt{D_{корп}/100} \qquad (5\text{-}43)$$

— коэффициент, учитывающий изменение теплоотдачи по длине корпуса машины в зависимости от его диаметра и частоты вращения.

При соблюдении рекомендаций § 3-9 по выбору параметров наружного вентилятора могут быть обеспечены расход (м³/с) и напор (Па) воздуха соответственно:

$$V'_в \approx 0{,}6\,(n_1/1000)\,(D_{корп}/100)^3\cdot 10^{-2}; \qquad (5\text{-}44)$$

$$H \approx 12{,}3\,(n_1/1000)^2\,(D_{корп}/100)^2. \qquad (5\text{-}45)$$

Полученное таким образом значение $V'_в > V_в$ (как правило).

Глава 6

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

§ 6-1. Общие положения

Среди ряда показателей качества электрической машины надежность — основной. Если надежность задана, то расчет должен ее подтвердить. Чтобы спроектировать электрическую машину с экономически оптимальными показателями надежности, необходимо расчет провести для ряда вариантов. Оптимальные значения показателей надежности должны быть получены в результате технико-экономических расчетов. Для расчета надежности электрических машин необходимо прежде всего ознакомиться с некоторыми основными понятиями, терминами и определениями из области надежности, соответствующими ГОСТ 27.002—83.

Надежность электрической машины — свойство машины выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования,

технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения машины и условий ее эксплуатации может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость в отдельности или определенное сочетание этих свойств как для машины, так и для ее узлов.

Безотказность — свойство машины непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность — свойство машины сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтопригодность — свойство машины, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения ее отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Сохраняемость — свойство машины непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Состояние электрической машины характеризуется следующими понятиями.

Исправное состояние (исправность) — состояние машины, соответствующее всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией, даже таким второстепенным, как качество окраски.

Неисправное состояние (неисправность) — состояние машины, противоположное исправному.

Работоспособное состояние (работоспособность) — состояние машины, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Неработоспособное состояние (неработоспособность) — состояние машины, противоположное работоспособному.

Предельное состояние — такое состояние машины, при котором дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности, или неустранимого ухода заданных параметров за установленные пределы, или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой, или нецелесообразности проведения среднего или капитального ремонта. Признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией на данную машину.

Рассмотрим два события: повреждение и отказ.

Повреждением называется событие, заключающееся в нарушении исправности машины или ее узлов вследствие влияния внешних воздействий, превышающих уровни, установленные нормативно-технической документацией на машину. Повреждение может быть существенным и являться причиной нарушения работоспо-

собности и несущественным, при котором работоспособность машины сохраняется.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособности машины. Отказы могут быть внезапные и постепенные, независимые и зависимые, перемежающиеся, конструктивные, производственные и эксплуатационные.

Электрические машины могут быть восстанавливаемые и невосстанавливаемые, ремонтируемые и неремонтируемые.

Почти любая электрическая машина может быть отремонтирована. Однако это не означает, что к любой машине можно применять термин «восстанавливаемая». Причина в том, что восстановление электрической машины должно быть экономически оправдано. Если стоимость ремонта превышает стоимость изготовления новой машины на специализированном электромашиностроительном заводе, то такую машину считают «невосстанавливаемой» низковольтные асинхронные двигатели небольшой мощности считаются «невосстанавливаемыми». Подавляющее большинство отказов этих двигателей составляют отказы обмоток. Поэтому ремонт двигателей требует полной замены обмотки, но в условиях эксплуатации перемотка двигателей сто́ит дороже изготовления нового).

Наработкой называется продолжительность или объем работы машины. Обычно наработка электрической машины выражается в единицах времени, но может выражаться и в других единицах; например для генератора — в киловатт · часах вырабатываемой электроэнергии.

Технический ресурс (ресурс) — наработка машины от начала эксплуатации или ее возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации машины или ее узлов от начала или ее возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Срок сохраняемости — календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования машины в заданных условиях, в течение или после которой сохраняются значения заданных показателей в установленных пределах.

Показатель надежности — количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность машины. Эти показатели могут быть единичными или комплексными. Единичный показатель надежности относится к одному из свойств, составляющих надежность машины, а комплексный — к нескольким свойствам.

Рассмотрим единичные показатели надежности. Безотказность характеризуется следующими показателями. *Вероятность безотказной работы* — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ машины не возникает; *средняя наработка до отказа* — математическое ожидание наработки машины до первого отказа; *интенсивность отказов* — условная плотность вероятности возник-

новения отказа невосстанавливаемой машины, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник; *параметр потока отказов* — плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемой машины, определяемая для рассматриваемого момента времени; *наработка на отказ* — отношение наработки восстанавливаемой машины к математическому ожиданию числа ее отказов в течение этой наработки.

Перечисленные показатели безотказности могут быть определены по статистическим данным об отказах следующим образом.

Вероятность безотказной работы и отказ соответственно будут

$$p\{t\}=(N-n_{\text{отк}}(t))/N;\quad Q\{t\}=1-p\{t\}=F(t). \qquad (6\text{-}1)$$

Здесь N — количество машин в начале испытаний; $n_{\text{отк}}(t)$ — количество машин, отказавших за время t; $F(t)$ — интегральная функция времени работы до отказа.

Следовательно, дифференциальный закон (плотность) распределения:

$$f(t)=Q'\{t\}=a(t), \qquad (6\text{-}2)$$

где

$$a(t)=n_{\text{отк}}(t)/(N\,\Delta t) \qquad (6\text{-}3)$$

— частота отказов.

Следовательно,

$$Q\{t\}=\int\limits_0^t a(t)\,dt;\quad p\{t\}=1-\int\limits_0^t a(t)\,dt. \qquad (6\text{-}4)$$

Интенсивность отказов

$$\lambda(t)=n_{\text{отк}}(t)/(N_{\text{ср}}\,\Delta t), \qquad (6\text{-}5)$$

где $N_{\text{ср}}$ — среднее количество машин, исправно работающих в интервале времени Δt.

Нетрудно показать, что

$$p(t)=e^{-\int\limits_0^t \lambda(t)\,dt};\quad \lambda(t)=a(t)/p\{t\};\quad a(t)=\lambda(t)\,e^{-\int\limits_0^t \lambda(t)\,dt}. \qquad (6\text{-}6)$$

Средняя наработка до отказа

$$T=\sum_{i=1}^{N} t_i/N=\int\limits_{-\infty}^{+\infty} tf(t)\,dt=\int\limits_0^{\infty} e^{-\int\limits_0^t \lambda(t)\,dt}, \qquad (6\text{-}7)$$

где t_i — время безотказной работы i-й машины.

Средняя наработка до отказа равна площади под кривой вероятности безотказной работы.

Средняя наработка на отказ

$$t_{\text{ср}}=\sum_{i=1}^{n} t_i/n_{\text{отк}}. \qquad (6\text{-}8)$$

Долговечность характеризуется следующим показателем. *Гамма-процентный ресурс* машины — наработка, в течение которой машина не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов:

$$p\{t_\gamma\}=\gamma/100. \qquad (6\text{-}9)$$

Левая часть уравнения (6-9) определяется по (6-1).

Кроме того, используются показатели: средний и назначенный ресурс, гамма-процентный, назначенный и средний срок службы.

Ремонтопригодность характеризуется следующими показателями. *Вероятность восстановления* в заданное время — вероятность того, что время восстановления работоспособности машины не превысит заданного. При этом под временем восстановления понимается время, затрачиваемое на обнаружение, поиск причины отказа и устранения последствий отказа.

Среднее время восстановления — математическое ожидание времени восстановления работоспособности.

Сохраняемость характеризуется следующими двумя показателями: гамма-процентным и средним сроком сохраняемости.

Среди комплексных показателей надежности применительно к электрическим машинам представляют интерес следующие показатели. *Коэффициент готовности* — вероятность того, что машина окажется работоспособной в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование машины по назначению не предусматривается. Коэффициент готовности

$$k_г=t_р/(t_р+t_в), \qquad (6\text{-}10)$$

где $t_р$ — наработка на отказ; $t_в$ — среднее время восстановления.

Коэффициент технического использования — отношение математического ожидания времени пребывания машины в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пребывания машины в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации. Коэффициент технического обслуживания

$$k_т=t_с/(t_с+t_{рем}+t_{об}), \qquad (6\text{-}11)$$

где $t_с$ — суммарная наработка за рассматриваемый период времени; $t_{рем}$ — время простоев на ремонт; $t_{об}$ — время простоев на техническое обслуживание.

Трудоемкость и *стоимость* технического обслуживания (ремонта) — также комплексные показатели надежности; они бывают средние и удельные.

§ 6-2. Структурные схемы надежности электрических машин

Для расчета надежности прежде всего следует разработать структурную схему надежности электрической машины, выявить



Рис. 6-1. Структурная схема надежности электромашинного преобразователя постоянного тока в однофазный

основные эксплуатационные факторы, влияющие на надежность, и оценить их количественно. В структурную схему должны войти основные узлы машины, подверженные отказам. Так, для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором такими узлами являются обмотка статора и подшипниковый узел, а в случае фазного ротора, кроме того, обмотка ротора и узел контактных колец. Для машин постоянного тока—обмотки: якоря, возбуждения, добавочных полюсов, компенсационная; щеточно-коллекторный и подшипниковый узлы. Для синхронных машин—обмотки статора и возбуждения, узлы контактных колец и подшипниковый.

Структурная схема электромашинных преобразователей несколько сложнее; в нее входят обмотки на неподвижных и вращающихся частях преобразователя, коллекторно-щеточный и подшипниковый узлы, блок регулирования, узел контактных колец. На рис. 6-1 приведена, как одна из наиболее сложных, структурная схема надежности электромашинного преобразователя постоянного тока в однофазный.

Для каждого элемента в структурной схеме должна быть разработана методика расчета надежности, основанная на математических моделях надежности этих узлов. Обычно в электрической машине отказ любого элемента в структурной схеме надежности приводит к отказу электрической машины. Если отказы элементов и узлов независимы, то вероятность безотказной работы электрической машины

$$P_{\text{э·м}} = \prod_{i=1}^{g} p_i, \qquad (6\text{-}12)$$

где p_i — вероятность безотказной работы i-го узла (всего узлов — g).

Если отказ одного из узлов зависит от вероятности отказа другого, то для определения вероятности безотказной работы электрической машины необходимо перемножить условные вероятности безотказной работы соответствующих узлов. Если вероятность безотказной работы отдельных узлов близка к единице, то эти узлы можно не учитывать в структурной схеме и при расчете надежности электрической машины.

§ 6-3. Математические модели надежности электрических машин

Следующим этапом разработки методик расчета надежности электрических машин является создание математической модели надежности для каждого узла, входящего в структурную схему. Отказы — случайные события, поэтому для построения математической модели надежности используется аппарат теории вероятностей и математической статистики.

При создании модели необходимо из большого количества параметров, характеризующих электрическую машину, выбрать основные, влияющие на надежность; второстепенные параметры должны быть отброшены. Определяют факторы и элементы, которые следует учитывать при построении. Составляют формализованную схему. Преобразование этой схемы в математическую модель выполняют математическими методами.

При составлении математической модели надежности электрической машины можно считать изделием всю электрическую машину. В этом случае модель получается довольно сложной. Можно пойти по другому пути и считать изделием каждый узел в структурной схеме надежности (межвитковую изоляцию, корпусную и межфазную изоляцию, подшипниковые узлы и т. п.). Тогда для каждого узла разрабатывается математическая модель и на ее основе методика расчета надежности узла. Рассчитав надежность основных узлов и зная по структурной схеме, как (параллельно или последовательно с точки зрения надежности) соединены эти узлы между собой, можно рассчитать надежность электрической машины.

Математические модели для разных видов электрических машин и их узлов приведены в [10, 12]. В настоящей главе рассмотрим подробно только математические модели для наиболее распространенных электрических машин — асинхронных двигателей. Среди асинхронных двигателей менее надежны двигатели со всыпной обмоткой. В них отказы обмоток составляют 95—98% от общего количества отказов, поэтому целесообразно рассмотреть математическую модель для этого наименее надежного узла двигателей со всыпной обмоткой.

Для обмоток асинхронных двигателей разработаны две математические модели надежности. Обе они основаны на известной в теории надежности модели прочности. Однако в качестве параметра, характеризующего электрическую прочность изоляции, в первой модели принято пробивное напряжение, а во второй — дефектность. Под *дефектностью* понимается число дефектов на единице длины или площади изоляции, а *дефектом* считается сквозное повреждение изоляции, пробивное напряжение которого не выше напряжения перекрытия по поверхности изоляции промежутка, имеющего длину, равную толщине изоляции. Обмотку асинхронного двигателя можно представить как изделие, состоящее из ряда элементов. Такими элементами являются межвитковая, корпусная и межфазная изоляции. Среди этих элементов всыпной об-

мотки отказы распределяются следующим образом (%): межвитковые замыкания — 93, корпусная изоляция — 2, межфазная изоляция — 5. Ознакомимся с математическими моделями для межвитковой изоляции.

Рассмотрим первую математическую модель (см. [10, 11, 12]). Элементами межвитковой изоляции можно считать два проводника, расположенных рядом в пазу или лобовой части обмотки и разделенных межвитковой изоляцией. Для успешной работы межвитковой изоляции обмотки необходима исправность всех входящих в нее элементов, так как пробой изоляции между парой соседних проводников приводит к отказу всей обмотки. Естественно считать, что элементы отказывают независимо друг от друга. Элементы обмотки можно считать одинаковыми. Пробивное напряжение всех пар соседних проводников подчиняется фиксированному распределению вероятностей. Отказ происходит тогда, когда напряжение, приложенное к соседним проводникам, превышает пробивное напряжение межвитковой изоляции в данном месте. Приложенное напряжение также обладает некоторым распределением вероятностей. Согласно модели прочности, вероятность того, что межвитковая изоляция не пробьется, равна вероятности того, что пробивное напряжение межвитковой изоляции превосходит приложенное к ней напряжение. На рис. 6-2 графически представлена математическая модель надежности межвитковой изоляции.

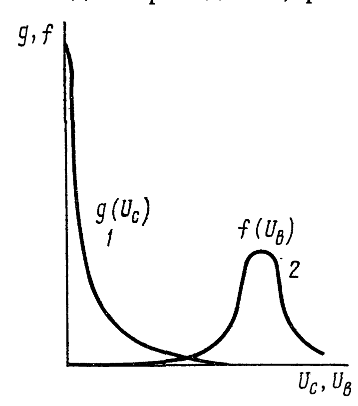


Рис. 6-2. Графическая интерпретация математической модели надежности межвитковой изоляции:

1 — плотность распределения напряжений, приложенных между витками; 2 — плотность распределения пробивных напряжений, характеризующих электрическую прочность межвитковой изоляции

Вероятность безотказной работы элемента межвитковой изоляции

$$P_э = \int_0^\infty \int_{U_с}^\infty f(U_в)\, g(U_с)\, dU_в dU_с. \qquad (6\text{-}13)$$

где $f(U_в)$ и $g(U_с)$ — соответственно плотности распределения пробивного и приложенного напряжений.

Проведенные исследования (см. [11, 12]) позволили получить математическую модель межвитковой изоляции в следующем виде:

$$P_{м.в} = \prod_i \left\{1 - \left[\sum_l \frac{0,975 s^2 l^{0,7} \exp(-0,278 l^{1,3})}{\sigma^2_{U_{ci}} \sqrt{2\pi}} \times \right.\right.$$

$$\left.\left. \times \int_0^\infty \exp\left[\frac{(Vs/l - M_{U_{ci}})^2}{2\sigma^2_{U_{ci}}} \left(1 - \exp\left(\frac{V^{\alpha_2}}{k_и^{\alpha_2} U_2}\right)\right) dV\right]^x \right\}, \qquad (6\text{-}14)$$

где l — разность номеров между соседними проводниками (проводники пронумерованы в порядке их намотки на шаблон); s — количество проводников в пазу; i — порядковый номер секции; V — напряжение, приложенное к проводникам с разностью номеров l; M_{Uci} — математическое ожидание напряжения на i-й секции; σ_{Uci} — среднее квадратичное отклонение напряжения, приложенного к i-й секции; $k_и$ — коэффициент импульса; α_2, U_2 — параметры распределения Вейбулла (для пробивных напряжений); $\varkappa$ — количество включений электродвигателя за заданную наработку.

Методика расчета надежности межвитковой изоляции всыпной обмотки асинхронного двигателя (основанная на приведенной математической модели), а также методика расчета других элементов этой обмотки — корпусной и межфазной изоляции — приведены в [11].

Рассмотрим **вторую математическую модель** для межвитковой изоляции, а также модели для корпусной и межфазной изоляции, которые основаны также на модели прочности, но параметром, характеризующим электрическую прочность изоляции, является дефектность. В настоящей главе рассмотрим только основные положения и допущения, положенные в основу модели; формулы, входящие в математическую модель, приведены в § 9-15 при изложении методики расчета надежности всыпной обмотки статора асинхронного двигателя.

При построении математической модели приняты следующие положения и допущения. Отказ изоляции обмотки происходит в результате к. з. (виткового, корпусного, межфазного), которое возможно только при существовании дефектов композиции витковой, корпусной и межфазной изоляции. Дефект может иметь место при поставке материалов, возникнуть в процессе изготовления обмотки (порезы, проколы, сдиры, трещины) и образоваться в результате старения (трещины). Перекрытие промежутков между токоведущими частями в местах дефектов происходит в результате воздействия коммутационных перенапряжений, возникающих при пуске, отключении или реверсе электродвигателя. При расчете вероятности отказа витковой изоляции учитываются только плотно касающиеся участки соседних витков. Принято, что отказ корпусной и межфазной изоляции может произойти только при повреждении всех слоев в пределах элементарного участка.

Согласно математической модели вероятность отказа обмоток рассчитывают для последовательных интервалов времени наработки. Величина интервала выбирается такой, в пределах которой дефектность изоляции изменяется несущественно. Дефекты на слоях в пределах элементарного участка композиции изоляции принимаются совпадающими. Дефектность изоляции определяется на непропитанных обмоточных проводах, пазовой и межфазной изоляции, уложенных, а затем аккуратно извлеченных из паза. Влияние пропитки обмотки учитывается соответствующим коэффициентом. Исходная дефектность проводов определяется из предположения, что дефектна изоляция, имеющая сквозные повреждения.

Дефектность определяется исходя из того, что дефекты расположены на длине провода случайно и распределены по длине провода по закону Пуассона. Методика расчета надежности всыпных обмоток статора асинхронных двигателей выпущена в виде отраслевого стандарта ОСТ 16.0.800.821—81. Эта методика в упрощенном виде и пример расчета по ней приведены в § 9-15.

Глава 7

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Технический уровень спроектированной электрической машины специализированного назначения может быть оценен степенью осуществления в проекте основных характеристик, необходимых для данной установки. Например, в качестве требования такой установки может являться минимальная масса или минимальный динамический момент инерции. Для некоторых установок требуется минимальная высота или длина машины. В других случаях превалирующими являются требования к КПД или коэффициенту мощности, к пусковому моменту, максимальному моменту и т. п. В таких случаях критерием технического уровня или эффективности машин является удовлетворение одному или нескольким из указанных требований. Если эти требования противоречивы, то необходимо находить приемлемое решение, удовлетворяющее в определенной мере каждому из них.

Однако большинство электрических машин проектируются и изготовляются для общего назначения. Такие машины могут быть использованы в различных установках. Машины общего назначения обычно изготовляются в виде серии машин со стройно нарастающими основными параметрами — мощностью и геометрическими размерами. Эти машины должны удовлетворять в части рабочих характеристик требованиям действующих стандартов или технических условий и вместе с тем быть экономически эффективными для народного хозяйства.

Например, при соблюдении указанных требований стандартов машины могут быть спроектированы с высоким использованием активных (проводниковых и магнитных) материалов, иметь уменьшенную массу и, следовательно, стоимость. Однако если при этом ухудшаются энергетические показатели, то повысится стоимость потерь энергии.

Одним из критериев технико-экономической эффективности является уровень компактности. Чем выше компактность машины, тем меньше необходимые для установки машины площадь и объем. Компактность электрических машин благоприятно влияет на экономические показатели большинства объектов, например сокращается длина или ширина станков и других механизмов, в которых применены электродвигатели.

Показатель компактности электрической машины (кВт/мм³)

$$K_к = P_2/(4h^2L), \qquad (7\text{-}1)$$

где P_2 — номинальная мощность машины, кВт; h — высота оси вращения, мм; L — габаритная длина машины, мм.

Одним из направлений повышения компактности является уменьшение высоты оси вращения и применение максимально допустимого наружного диаметра машины при выбранном значении h, что дает возможность уменьшить L.

Важным критерием является уровень шума электрических машин. Высокий уровень шума в производственном помещении, где установлены машины, отрицательно влияет на производительность труда, отражается на качестве продукции, вызывает потери рабочего времени в результате частичной или временной нетрудоспособности производственного персонала.

Технический уровень спроектированной электрической машины оценивают путем сравнения технико-экономических показателей этой машины с показателями лучших изделий-аналогов отечественного и зарубежного производства. Учитывая, что при этом сравнивают разные показатели машин — массу, габариты, энергетические показатели и др., целесообразно общую оценку технического уровня производить по обобщенному показателю (см. [34])

$$Э = Q/C_{маш}, \tag{7-2}$$

где Q — экономический эффект от применения спроектированной машины по сравнению с машиной-аналогом; $C_{маш}$ — стоимость машины.

В качестве базы принимают себестоимость спроектированной машины или цену по прейскуранту машины-аналога отечественного производства. Экономический эффект представляет собой сумму отдельных составляющих (руб.) эффект: обусловленная разностью КПД

$$Q_1 = 5850\,P_2(\eta' - \eta'')/(\eta'\eta''), \tag{7-3}$$

обусловленная разностью коэффициентов мощности (только для асинхронных двигателей)

$$Q_2 = 1350\,P_2(\operatorname{tg}\varphi''/\eta'' - \operatorname{tg}\varphi'/\eta'), \tag{7-4}$$

обусловленная разностью показателей компактности

$$Q_3 = (100 + 76\lg P_2)\ (K'_к - K''_к), \tag{7-5}$$

обусловленная разностью уровней шума

$$Q_4 = 960 \cdot 10^{0,1\,(L' - 93,4)}\,[10^{-0,1\,(L' - L'')} - 1], \tag{7-6}$$

обусловленная разностью массы машин, влияющей на уровень конструкции и технологического оборудования,

$$Q_5 = 0,3\,(m'' - m'). \tag{7-7}$$

Здесь P_2 — номинальная мощность, кВт; η', η'' — КПД спроектированной машины и машины-аналога; $\operatorname{tg}\varphi'$, $\operatorname{tg}\varphi''$ — тангенс угла сдвига между напряжением и током спроектированного двигателя и двигателя-аналога; $K'_к$, $K''_к$ — показатели компактности спроектированной машины и машины-аналога; L', L'' — уровни шума (зву-

кового давления) спроектированной машины и машины-аналога, дБ·А (если разность уровней звукового давления более 5 дБ·А, то следует сократить разность до указанного значения. Следует отметить, что фактический уровень звукового давления спроектированной машины может быть установлен после испытания и исследования опытных образцов машины. До изготовления опытных образцов в производимых технико-экономических расчетах составляющая эффективности уровня звукового давления не учитывается); m', m'' — масса спроектированной машины и машины-аналога.

Таким образом, экономический эффект

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4+Q_5. \qquad (7\text{-}8)$$

Составляющая эффекта, обусловленная повышением надежности электрической машины Q_6, если она может быть рассчитана, добавляется в (7-8).

Себестоимость машины (руб.)

$$C_{\text{маш}}=C_{\text{мат}}+C_{\text{пр}}, \qquad (7\text{-}9)$$

где $C_{\text{мат}}$ — общая стоимость материалов, примененных в машине, руб.; $C_{\text{пр}}$ — стоимость производства машины, руб.

Стоимость материалов может быть определена, исходя из заготовительной массы материалов и цены материалов по формулам, приведенным в табл. 7-1.

Таблица 7-1

Наименование материала	Заготовительная масса, кг	Стоимость материала, руб.
Провода обмоток	$m'_{\text{м}}=1{,}03m_{\text{м}}$	$C_{\text{м}}=c_{\text{м}}m'_{\text{м}}$
Коллекторная медь	$m'_{\text{м.к}}=1{,}1m_{\text{м.к}}$	$C_{\text{м.к}}=c_{\text{м.к}}m'_{\text{м.к}}$
Алюминий короткозамкнутого ротора	$m'_{\text{ал2}}=1{,}05m_{\text{ал2}}$	$C_{\text{ал2}}=c_{\text{ал2}}m'_{\text{ал2}}$
Сталь сердечников статора и ротора асинхронного двигателя	$m'_{\text{с}\Sigma}=7{,}8l_{\text{эф1}}(D_{\text{н1}}+\Delta_{\text{шт}})^2\cdot10^{-6}$	$C_{\text{с}\Sigma}=c_{\text{с}}m'_{\text{с}\Sigma}$
Сталь сердечника якоря	$m'_{\text{с2}}=7{,}8l_{\text{эф2}}(D_{\text{н2}}+\Delta_{\text{шт}})^2\cdot10^{-6}$	$C_{\text{с2}}=c_{\text{с}}m'_{\text{с2}}$
Сталь сердечников главных полюсов	$m'_{\text{п}}=7{,}8\cdot2pl_{\text{эф.п}}b_{\text{н.п}}h_{\text{п}}\cdot10^{-6}$	$C_{\text{п}}=c_{\text{с}}m'_{\text{п}}$
Сталь сердечников добавочных полюсов	$m'_{\text{д}}=1{,}1m_{\text{д}}$	$C_{\text{д}}=c_{\text{с}}m'_{\text{д}}$
Сталь массивной станины	$m'_{\text{с1}}=1{,}1m_{\text{с1}}$	$C_{\text{с1}}=c_{\text{с}}m'_{\text{с1}}$
Сталь шихтованной станины	$m'_{\text{с1}}=1{,}25m_{\text{с1}}$	$C_{\text{с1}}=c_{\text{с}}m'_{\text{с1}}$
Изоляция	$m'_{\text{и}}=1{,}05m_{\text{и}}$	$C_{\text{и}}=c_{\text{и}}m'_{\text{и}}$
Конструкционные материалы	$m'_{\text{к}}=1{,}1m_{\text{к}}$	$C_{\text{к}}=c_{\text{к}}m'_{\text{к}}$

Здесь m, m' — «чистая» и заготовительная массы расматриваемого рода материала; $l_{\text{эф1}}$, $l_{\text{эф2}}$, $l_{\text{эф.п}}$ — эффективная длина сердечника соответственно статора, якоря, главного полюса, т. е. длина сердечника без учета изоляционного покрытия и неплотного прилегания листов, наличия радиальных вентиляционных каналов; $\Delta_{\text{шт}}$ — припуск на штамповку; $b_{\text{н.п}}$ — ширина полюсной дуги; $h_{\text{п}}$ — высота главного полюса.

Значения «чистой» массы материалов определены в § 9-14, 10-17, 11-14. Заготовительная масса сердечников статора и ротора (остова и полюсов) синхронных машин вычисляется в соответствии с принятой конструкцией ротора и намеченным процессом штамповки листов статора (использованием внутренней вырубки).

Стоимость $c_м$ проводов обмоток приведена в табл. 7-2.

Таблица 7-2

Марка и форма поперечного сечения провода	Стоимость $c_м$, руб/кг	Марка и форма поперечного сечения провода	Стоимость $c_м$, руб/кг
Прямоугольная		**Круглая**	
ПЭТВП	$1,14+0,72/S$	ПЭТВ	$1,22+0,3/d$
ПЭТГ-155	$1,32+0,84/S$	ПЭТ-155	$1,42+0,35/d$
ПЭТКП	$1,53+0,97/S$	ПЭТК	$1,65+0,4/d$
ПСД	$1,1+1,5/S$	ПСД	$1+0,6/d$
ПСДК	$1,18+2,4/S$	ПСДК	$1+0,8/d$
ПСДКТ	$1,28+7,4/S$	ПСДКТ	$0,7+2,5/d$
Неизолированные шины и ленты марки МГМ	$0,98+0,5/S$	Коллекторная медь марки МГТ — трапецеидальная	$1,05+2/S$

Здесь d и S — диаметр (мм) и площадь поперечного сечения (мм²) провода без изоляции.

Площадь поперечного сечения коллекторной меди (мм²)

$$S=b_к h_к(1-h_к/D_к), \tag{7-10}$$

где $b_к=t_к-b_и$ — ширина коллекторной пластины (большее основание трапеции); $h_к\approx 12,4\sqrt[4]{D_к}-10$ мм — высота коллекторной пластины; $D_к$ — наружный диаметр коллектора, мм.

Для обмоток статора на напряжение 6 кВ, выполняемых из прямоугольных эмалированных проводов с дополнительной двухслойной изоляцией из стекловолокна (например, марки ПЭТВСД), стоимость $C_м$, получаемую из табл. 7-1, следует увеличивать в 1,6 раза. Для алюминия короткозамкнутого ротора $c_{ал}=0,65$ руб/кг. Стоимость листовой стали $c_с$ приведена ниже:

Марка стали	2013	2312	2312	2411	3411	ст 3
Толщина, мм	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	10—6
Значение $c_с$, руб/кг	0,21	0,25	0,225	0,30	0,25	0,096

Средняя стоимость изоляции $c_и$ составляет при классе нагревостойкости изоляции B 12 руб/кг, классе F —16 руб/кг и классе H—22 руб/кг. Средняя стоимость конструкционных материалов $c_к=0,38$ руб/кг.

Суммарная стоимость материалов (руб.) машин переменного тока

$$C_{мат}=C_{м\Sigma}+C_{ал}+C_{с\Sigma}+C_и+C_к; \tag{7-11}$$

машин постоянного тока

$$C_{мат}=C_{м\Sigma}+C_{м.к}+C_{с\Sigma}+C_и+C_к. \tag{7-12}$$

Здесь $C_{м\Sigma}$ — суммарная стоимость обмоточных проводов; $C_{c\Sigma}$ — суммарная стоимость листовой стали.

Стоимость производства, а следовательно, и себестоимость машины на электромашиностроительном предприятии определяется путем подробной калькуляции с учетом масштаба выпуска, уровня технологического процесса, уровня механизации и автоматизации производства. Однако при разработке проекта и сравнения различных вариантов достаточно определить приближенное значение стоимости производства

$$C_{пр} \approx k_{пр} \sqrt{h}\, D^2_{н1} (0,4 + l/D_{н1}). \tag{7-13}$$

Здесь $k_{пр}$ — коэффициент, определяемый совершенством оборудования, технологического процесса и организации производства (среднее значение $k_{пр} = 3{,}2 \cdot 10^{-4}$ для асинхронных двигателей; $k_{пр} = 6{,}5 \cdot 10^{-4}$ — для машин постоянного тока и синхронных машин).

Приведенный выше метод следует также применять для сравнения показателей технического уровня отдельных вариантов спроектированной машины. При этом себестоимость машины определяют отдельно для каждого варианта, а составляющую эффекта Q_5, обусловленную разностью массы машин, исключают из (7-8), так как при расчете себестоимости машин учитывается изменение массы материалов, а также влияние массы на техно-нологический процесс и на стоимость производства машин.

Глава 8

ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

§ 8-1. Общие сведения

За последние годы ЭВМ применяют практически во всех областях народного хозяйства. Поэтому в планы подготовки студентов вузов по большинству инженерных специальностей включена дисциплина «Программирование и применение ЭВМ». Применительно к электрическим машинам эта дисциплина изложена в [19]. Изучение вопросов применения ЭВМ предшествует дисциплине «Проектирование электрических машин». Поэтому в настоящей главе учебника не рассматриваются подробно следующие вопросы, приведенные в [19]: применение метода планирования эксперимента к оптимизации электрических машин; проектирование электрических машин методом геометрического программирования; математическое обеспечение систем автоматизированного проектирования электрических машин; техническое обеспечение систем автоматизированного проектирования.

В настоящее время единичные электрические машины практически не проектируются (кроме особо мощных турбо- и гидроге-

нераторов), проектируют лишь серии электрических машин. При этом расчеты выполняются с помощью ЭВМ, что технически и экономически вполне оправдано. В [30] приведены данные о затратах времени на поверочный расчет асинхронного двигателя на ЭВМ; на ввод в машину исходных данных и печать результатов расчета уходит 80% времени, необходимого для поверочного расчета одного двигателя на ЭВМ. В связи с этим студенту при выполнении курсовых и дипломных проектов целесообразно расчет единичной электрической машины выполнять «вручную». Это целесообразно также потому, что при «ручном» счете студент лучше усваивает особенности проектирования на всех этапах и становится подготовленным к работе с ЭВМ. Однако для выполнения различных расчетных исследований, а также для оптимального и автоматизированного проектирования электрических машин необходимо использование ЭВМ.

Применение ЭВМ для выполнения большого объема поисковых и поверочных расчетов позволяет значительно повысить производительность труда расчетчиков, сократить сроки выполнения расчетных работ и снизить их себестоимость. По опыту проектирования единых серий асинхронных двигателей стоимость расчетных работ сокращается примерно в четыре раза, а время проведения расчетов — в два раза при одновременном уменьшении количества расчетчиков (см. [31]). Главный эффект от применения ЭВМ заключается в том, что нахождение для проектируемых машин оптимальных соотношений электромагнитных нагрузок и геометрических размеров, обеспечивающих наименьшие суммарные затраты на материалы, изготовление и эксплуатацию, обеспечивает при внедрении спроектированных серий машин большую экономию средств в народном хозяйстве.

§ 8-2. Оптимальное проектирование электрических машин

На первом этапе применения ЭВМ для проектирования серий электрических машин в 1957 г. (см. [30]) выбор оптимального варианта расчета осуществлялся путем последовательных приближений с чередованием расчетов на ЭВМ с «ручным» счетом. Однако такой путь был длителен, так как много времени уходило на многократный ввод в ЭВМ исходных данных и на печать результатов расчета каждого из промежуточных вариантов. Значительно эффективнее автоматический режим работы машины. При этом машина переходит от одного рассчитанного варианта к другому, сравнивая полученные результаты по определенным заранее заданным критериям с выбором наиболее целесообразного варианта. При этом машина сама определяет направление дальнейшего движения в поиске оптимального варианта и совершает последующий шаг, используя информацию, полученную на предыдущих шагах. Такой метод поиска оптимального варианта известен как случайный поиск с самообучением. В памяти ЭВМ сохраняются результаты нескольких предыдущих расчетов и по

ним прогнозируется наивыгоднейшее направление очередного перемещения.

Технические требования при проектировании обычно задаются в виде неравенств. Математическим аппаратом, специально созданным для решения задач оптимизации нелинейных моделей с ограничениями в виде неравенств, является *нелинейное программирование*. Нелинейная функция n переменных $F(\dot{x}_n)$, которую требуется оптимизировать, т. е. максимизировать или минимизировать, называется *функцией цели*

$$\left.\begin{aligned} &F(\dot{x}_n)=\min; \\ &f_j(\dot{x}_n)\leqslant 0; \quad j=1, \ldots, m; \\ &x_i\geqslant 0; \quad i=1, \ldots, n. \end{aligned}\right\} \tag{8-1}$$

Для машин общего назначения $F(\dot{x}_n)$ — это приведенная стоимость машины; $\dot{x}_n$—n-мерный вектор независимых переменных, от которого зависит значение $F(\dot{x}_n)$. Составляющими вектора $\dot{x}_n$ могут быть геометрические размеры машины, качество исходных материалов, рассеивание размеров и других физических величин, качество изготовления, электромагнитные нагрузки и т. п. Геометрическим образом целевой функции является *поверхность отклика*. Линейные или нелинейные функции $f_j(\dot{x}_n)$, определенные в том же пространстве независимых переменных, значения которых не должны быть больше (или меньше) определенных наперед заданных значений, называются *ограничениями* или *лимитерами*. Ограничениями при проектировании электрических машин являются превышения температуры обмоток или других частей машины, энергетические показатели, ограничения на некоторые размеры активной части, накладываемые конструкцией и технологией. Кроме того, для асинхронных и синхронных машин — максимальный момент, начальные пусковые ток и момент (кроме асинхронных двигателей с фазным ротором); для машин постоянного тока — коммутационные параметры. Задача программирования состоит в минимизации функции $F(\dot{x}_n)$ при заданных условиях.

Выбор критерия оптимизации — весьма ответственный этап проектирования. Если электрическая машина имеет узкоспециализированное назначение, то целевая функция может быть сформулирована заказчиком. Например, максимальная мощность, максимальный момент, минимальная масса, минимальный расход меди, минимальная длина, максимальный КПД, максимальный коэффициент мощности.

Для электрических машин, не имеющих определенного заказчика (общего назначения), критерий оптимизации должен отражать народнохозяйственную эффективность. Таким критерием может быть критерий минимальной обобщенной стоимости

$$C(\dot{x},\dot{y})=C_п(\dot{x},\dot{y})+C_э(\dot{x},\dot{y}), \tag{8-2}$$

где $C_п$ — приведенные затраты на изготовление машины; $C_э$ — эксплуатационные затраты; $\dot{x}$ — вектор переменных, варьируемых

при оптимизации отдельной машины (диаметр расточки статора, и длина сердечника, количество витков, высота и ширина пазов статора и ротора и т. п.); $\dot{y}$ — постоянные проектирования, общие для ряда машин серии (магнитная проницаемость и удельные потери электротехнической стали, теплопроводность материалов, допустимые температуры, коэффициент заполнения паза, коэффициент загрузки, длительность использования).

Кроме критерия минимальной обобщенной стоимости могут быть предусмотрены и другие критерии или линейные комбинации из двух критериев. Так, при расчете асинхронных двигателей серии 4А в качестве второго критерия была принята минимальная длина сердечника статора как показатель наибольшей технологичности конструкции.

При расчете на ЭВМ используются методики расчета, изложенные в гл. 9—11 настоящей книги. Однако все применяемые зависимости должны быть заданы в аналитической или цифровой табличной форме. Целесообразно также выражать параметры в относительных единицах. Исходные данные можно подразделить на постоянные, переменные и лимитеры. Варианты расчета, не удовлетворяющие хотя бы одному из лимитеров, исключаются как неприемлемые.

При расчете электрических машин массового выпуска определенное влияние на выбор оптимального варианта оказывает необходимость унификации размеров штампов листов сердечников статора и ротора машин с одинаковой высотой оси вращения, но разных длин или унификации длин сердечников машин на разные частоты вращения при данных высоте оси вращения и длине корпуса. В этих случаях оптимизация проводится для наиболее массового типоразмера электрической машины.

Параметры, имеющие одинаковые значения, например для большой группы рассчитываемых асинхронных двигателей: количество фаз, частота тока, напряжение, коэффициенты заполнения сталью, удельные потери в стали, удельное сопротивление материала обмотки, входят в расчетные формулы в числовом виде.

При проектировании асинхронных двигателей в течение расчета — поиска варьируются только следующие параметры: наружный диаметр сердечника статора $D_{н1}$, внутренний диаметр сердечника статора D_1, длина сердечника l_1, размеры пазов статора и ротора, количество витков и прочие зависящие от них параметры — индукция в воздушном зазоре B_δ, диаметр вентилятора, сечение короткозамыкающих колец, длина лобовой части обмотки статора и т. п. Следует заметить, что наружный диаметр сердечника статора определяют только для базового типоразмера двигателя, а для других типоразмеров двигателей принятой высоты оси вращения он остается постоянным. При расчете накладывается и ряд конструкционно-технологических ограничений. Например, ширина зубцов статора и ротора в наиболее узком месте не должна быть меньше $(1+0{,}01\,D_{н1})$, мм; высота спинки статора не должна быть меньше $0{,}055\ D_{н1}$, мм.

При указанном критерии оптимальности минимальная обобщенная стоимость, энергетические показатели электрической машины автоматически получаются оптимальными.

§ 8-3. Расчетные исследования с помощью ЭВМ

В процессе проектирования электрических машин возникает необходимость проведения ряда расчетных исследований с помощью ЭВМ. Так, например, весьма полезно знать влияние коэффициентов целевой функции на геометрию оптимальной машины. Подробные сведения о проведении этих и ряда других исследований приведены в [31, 33]. *Коэффициентами целевой функции* будем называть множители, с помощью которых при известных массо-энергетических показателях электрической машины определяют стоимости ее изготовления и эксплуатации. К коэффициентам целевой функции относятся цены на материалы и электроэнергию, нормативный срок окупаемости, показатели интенсивности использования.

В [33] исследовано влияние нормативного срока окупаемости, расчетного коэффициента загрузки и расчетного числа часов нагружения в году на технико-экономические показатели асинхронных двигателей. Было установлено, что при изменении срока окупаемости в интервале четыре — восемь лет он не оказывает существенного влияния на расход материалов и электроэнергии.

Коэффициент загрузки и расчетное количество часов нагружения в году входят только в слагаемое целевой функции, характеризующее эксплуатационные затраты. При изменении стоимости потерь энергии $C_э$ по любой причине алгоритм оптимального проектирования будет стремиться так изменить геометрию, а следовательно, и стоимость двигателя $C_д$, чтобы изменение обобщенных затрат было оптимальным. Так, при увеличении количества часов нагрузки в году увеличится $C_э$, поэтому начнется движение оптимальной точки в сторону уменьшения $C_э$, т. е. начнет увеличиваться КПД за счет увеличения расхода материалов. Такое же влияние на целевую функцию оказывает коэффициент загрузки, поэтому для оптимального проектирования важно точно знать количество часов работы в году и коэффициент загрузки двигателя. Результаты исследований, проведенных для уточнения этих параметров, приведены в [33]. Оказалось, что среднее для промышленности число часов работы $h_{ср}$ хорошо коррелировано с начальной мощностью:

$$h_{ср} = 545 + 376\sqrt[4]{P_2}. \qquad (8\text{-}3)$$

Интересно также проведенное в [31] исследование зависимости технико-экономических показателей асинхронных двигателей от коэффициентов влияния ряда исходных данных для проектирования. Ими являются магнитная проницаемость и удельные потери электротехнической стали, коэффициент заполнения паза, допустимая температура обмотки статора. *Коэффициентом влияния входного параметра на функцию* называется приращение функции

в процентах, вызванное изменением параметра на один процент. В результате проведенного исследования получена система уравнений, которая при любом изменении исходных данных позволяет наметить комплекс мероприятий для максимального отрицательного приращения обобщенной стоимости двигателя. В частности, могут быть рассчитаны лимитные цены на новые материалы, т. е. такие цены, которые в сочетании с новыми свойствами материалов дают нулевое приращение целевой функции — обобщенной стоимости двигателя.

Высоты оси вращения электрических машин нормализованы (см. гл. 9). Поэтому может оказаться необходимым скорректировать выбранные по расчету оптимальные значения наружного диаметра сердечника $D_{н1}$. Представляет интерес расчетное исследование на ЭВМ влияния отклонений от оптимальных значений наружных диаметров сердечника статора (на ±20%) на обобщенную стоимость C. В результате оказалось, что имеется следующая зависимость:

$$\Delta C = 2(\Delta D_{н1})^2. \tag{8-4}$$

В [31] приведены результаты расчетного исследования, проведенного с помощью ЭВМ, влияния класса нагревостойкости примененной изоляции на энергетические характеристики и суммарные затраты. Это исследование проводилось на асинхронных двигателях с $h = 180 \div 225$ мм и степенью защиты 1Р23. Были выполнены поисковые расчеты оптимальных двигателей с изоляцией классов нагревостойкости Е и F. Было учтено, что провода класса F дороже проводов класса Е примерно на 16%. Расчеты показали, что переход с изоляции класса нагревостойкости Е на изоляцию класса F позволяет в среднем уменьшить расход меди на 15%, электротехнической стали — на 18%, стоимость двигателей снижается на 12%, суммарные затраты на 2,8%. При этом КПД при коэффициенте загрузки 0,6 уменьшается на 0,6%, а коэффициент мощности практически не меняется.

Приведенные примеры показывают высокую эффективность применения ЭВМ для проведения расчетных исследований в процессе проектирования электрических машин.

§ 8-4. Система автоматизированного проектирования электрических машин

Системой автоматизированного проектирования электрических машин (САПРЭМ) называется комплекс технических, информационных и математических средств, предназначенных для автоматизации процессов расчета и конструирования электрических машин с участием человека (см. [19]). Эта система особенно эффективна при проектировании серий электрических машин, так как требуется выполнение большого объема не только расчетных, но и конструкторско-технологических работ. Поэтому кроме оптимального расчетного проектирования электрических машин с

помощью ЭВМ возникла необходимость применения их также для автоматизации разработки конструкции и технологии. Автоматизация проектно-конструкторских работ осуществляется таким образом, чтобы при сохранении творческой деятельности конструктора были автоматизированы работы, связанные с повторением ранее решенных задач с вычерчиванием деталей узлов и отдельных элементов. При автоматизации проектирования получают также информацию для станков с числовым программным управлением и для изготовления технологической оснастки (штампы, пресс-формы, модели и т. п.).

Система автоматизированного проектирования предусматривает соединение в одну систему всех стоящих при проектировании задач. При этом выходная информация одного этапа машинного проектирования является исходной для последующего с исключением ручных процедур преобразования информации. Можно САПРЭМ разбить на следующие отдельные относительно автономные подсистемы: расчетное и конструкторское проектирование, ведение чертежной документации в серийном производстве. Можно проследить следующие основные этапы системы проектирования. На основе математической модели электрической машины (а ею является методика расчета) осуществляются оптимизационные расчеты активной части машины. Далее проводятся поверочные расчеты, которые охватывают все технические характеристики электрической машины и предусматривают унификацию и доводку важнейших элементов и узлов машины. Поверочные расчеты проводятся в диалоговом режиме работы расчетчика с ЭВМ. Проектировщик задает исходные данные с помощью дисплея и на его экране получает информацию о результатах расчета. Параметры и характеристики, полученные в результате поверочных расчетов, используются для разработки конструкции. При этом используется пакет прикладных программ машинной графики. Автоматизация проектирования конструкции предусматривает воспроизведение отдельных элементов конструкции, которые на основе многолетнего опыта имеют отработанные формы и не претерпевают существенных изменений. Проектирование конструкции с применением ЭВМ содержит в основном те же этапы, которые имеются при «ручном» конструировании, а именно: разработку общего вида, сборочных единиц и деталей, окончательное оформление чертежей, спецификации и другой конструкторской документации. Для разработки общего вида электрической машины необходимо предварительно выбрать основные принципиальные конструктивные решения, а для проектирования элементов конструкции, создать математические модели этих элементов. С этой целью должны быть определены функциональные зависимости размеров элементов от главных размеров, высоты осей вращения электрической машины. Разработка конструкции включает в себя прочностные, виброакустические и другие расчеты. Изменение конструкции в процессе проектирования требует итерационного повторения поверочных расчетов.

Переходным этапом от разработки конструкции к технологии изготовления электродвигателей является выпуск технической документации на машинных носителях для автоматического изготовления оснастки и отделочных деталей на станках с числовым программным управлением, а также ведение чертежного хозяйства в производстве.

Одна из важных проблем успешного освоения САПРЭМ — создание банка данных электромеханических задач. Хранение, поиск и обработка данных приобретают в современных системах автоматизированного проектирования электрических машин первостепенное значение.

Глава 9

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

§ 9-1. Единые серии асинхронных двигателей

Общие сведения. Асинхронные двигатели — наиболее распространенный вид электрических машин, потребляющих в настоящее время около 40% всей вырабатываемой электроэнергии. Их установленная мощность постоянно возрастает.

Асинхронные двигатели широко применяются в приводах металлообрабатывающих, деревообрабатывающих и других станков, кузнечно-прессовых, ткацких, швейных, грузоподъемных, землеройных машин, вентиляторов, насосов, компрессоров, центрифуг, в лифтах, в ручном электроинструменте, в бытовых приборах и т. д. Практически нет отрасли техники и быта, где не использовались бы асинхронные двигатели.

Потребности народного хозяйства удовлетворяются главным образом двигателями основного исполнения единых серий общего назначения, т. е. применяемых для привода механизмов, не предъявляющих особых требований к пусковым характеристикам, скольжению, энергетическим показателям, шуму и т. п. Вместе с тем в единых сериях предусматривают также электрические и конструктивные модификации двигателей, модификации для разных условий окружающей среды, предназначенные для удовлетворения дополнительных специфических требований отдельных видов приводов и условий их эксплуатации. Модификации создаются на базе основного исполнения серий с максимально возможным использованием узлов и деталей этого исполнения.

В некоторых приводах возникают требования, которые не могут быть удовлетворены двигателями единых серий. Для таких приводов созданы специализированные двигатели, например электробуровые, краново-металлургические и др.

Разработанное в СССР и внедренное в производство основное исполнение единой серии подразделяется на два основных ряда: серию с $h=50\div355$ мм (мощностью от 0,12 до 400 кВт при $2p=4$) и серию с $h=400\div450$ мм (мощностью от 400 до 1000 кВт при $2p=4$).

Серия 4А. Основное исполнение серии. Двигатели выполняются с короткозамкнутым (при $h=50\div355$ мм) и с фазным роторами (при $h=200\div355$ мм). По степени защиты от внешних воздействий и по способу охлаждения различают: закрытое исполнение (IP44) с наружным обдувом от вентилятора, расположенного на валу двигателя (IC0141) при $h=50\div355$ мм; защищенное исполнение (IP23) с самовентиляцией (IC01) при $h=$ $=160\div355$ мм.

Двигатели мощностью от 0,12 до 0,37 кВт изготовляют на номинальные напряжения 220 и 380 В, со схемой соединения обмоток статора Δ или $\curlywedge$; эти двигатели имеют три выводных провода. Двигатели мощностью от 0,55 до 11 кВт, кроме того, выполняют на напряжение 660 В (при тех же схемах соединения и количестве выводных проводов). Двигатели мощностью от 15 до 110 кВт изготовляют на номинальные напряжения 220/380 и 380/660 В, а от 132 до 400 кВт — только на 380/660 В; эти двигатели имеют схему соединения $\Delta/\curlywedge$ и шесть выводных проводов. Двигатели с $h=50\div132$ мм выполняют с изоляцией класса нагревостойкости В; остальные — с изоляцией класса F. Общие технические данные на указанные двигатели регламентированы ГОСТ 19523—74.

Модификации серии 4А при $h=50\div355$ мм. На базе основного исполнения серии изготовляются следующие электрические модификации: двигатели с повышенным пусковым моментом ($h=160\div250$ мм), предназначенные для привода механизмов, имеющих большие статические и инерционные нагрузки в момент пуска (компрессоры, конвейеры, насосы, поворотные круги и т. д.);

двигатели с повышенным скольжением ($h=71\div250$ мм) — для работы в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками или с пульсирующей нагрузкой (штамповочные прессы, молоты, поршневые компрессоры и т. д.);

многоскоростные двигатели ($h=56\div355$ мм) на две, три и четыре частоты вращения — для привода механизмов со ступенчатым регулированием частоты вращения (металлообрабатывающие станки, механические колосниковые решетки, некоторые виды лебедок и т д.);

двигатели на частоту 60 Гц ($h=50\div355$ мм) — для работы от сети с указанной частотой.

Серия охватывает следующие конструктивные модификации: малошумные двигатели ($h=56\div160$ мм) — для работы в приводах с повышенными требованиями к уровню шума; встраиваемые двигатели ($h=50\div250$ мм) — для встраивания в станки и механизмы; двигатели поставляются в виде обмотанного сердечника статора и ротора;

двигатели со встроенной температурной защитой ($h=$ $=50\div355$ мм) — для привода механизмов, работающих со значительными перегрузками, частыми пусками, и т. д.

Серия охватывает следующие модификации по условиям окружающей среды: двигатели тропического исполнения ($h=50\div355$ мм) — для работы в условиях влажного или сухого тропического климата при температуре окружающего воздуха от —10 до +45 °C, относительной влажности до 100 % (при температуре +35 °C), при воздействии солнечной радиации, песка, пыли и плесневых грибков;

двигатели влагоморозостойкого исполнения ($h=50\div355$ мм) — для работы при температуре окружающей среды до —40 °C и относительной влажности 100 % (при температуре +25 °C);

двигатели химостойкого исполнения ($h=50\div355$ мм) — для работы при температуре окружающей среды в пределах ±40 °C, относительной влажности 80 % (при температуре +25 °C), наличии химически активной невзрывоопасной среды.

Серия А4. Серия охватывает следующие исполнения по степени защиты от внешних воздействий и по способу охлаждения: защищенное исполнение (IP23) с самовентиляцией (IC01) при $h=400$ и 450 мм;

закрытое исполнение (IP44) с охлаждением с помощью воздухоохладителя (IC0161) при $h=400$ и 450 мм.

Двигатели изготовляют с короткозамкнутым или фазным ротором и на номинальное напряжение 6000 В. Обмотка статора имеет шесть выводных проводов, соединенных в звезду. Обмотка статора выполняется с термореактивной изоляцией типа «Монолит» класса нагревостойкости F, с температурным использованием на уровне класса В. Обмотка фазного ротора имеет изоляцию класса нагревостойкости В.

§ 9-2. Исходные данные для проектирования

Для проектирования асинхронного двигателя должны быть заданы следующие исходные данные: 1. Номинальный режим работы по ГОСТ 183—74. 2. Исполнение ротора (короткозамкнутый, фазный). 3. Номинальная отдаваемая мощность по ГОСТ 12139—74. 4. Количество фаз статора. 5. Способ соединения фаз статора (⅄/△; △; ⅄). 6. Частота сети. 7. Номинальное линейное напряжение по ГОСТ 21128—75. 8. Синхронная частота вращения по ГОСТ 10683—73. 9. Степень защиты от внешних воздействий по СТ СЭВ 247—76. 10. Способ охлаждения по ГОСТ 20459—75. 11. Исполнение по способу монтажа по СТ СЭВ 246—76. 12. Климатические условия и категория размещения по ГОСТ 15150—69 и 15543—70. 13. Надежность по ГОСТ 19523—74. 14. Форма выступающего конца вала. 15. Способ соединения с приводимым механизмом.

Кроме того, дополнительно учитывают требования к высоте оси вращения по ГОСТ 13267—73 и к установочно-присоединительным размерам по ГОСТ 18709—73 или 20839—75.

Содержание перечисленных выше предписаний стандартов приведено в § 1-2 и § 9-15.

Во всем неоговоренном исходные данные машины должны удовлетворять требованиям ГОСТ 183—74.

Примечание. Количество пар полюсов

$$p=60f/n_1. \tag{9-1}$$

Примеры расчета машин

1. Исходные данные для проектирования

Наименование заданных параметров и их условные обозначения	Двигатель № 1	Двигатель № 2
Номинальный режим работы	Продолжительный ($S1$)	
Исполнение ротора	Короткозамкнутый	Фазный
Номинальная отдаваемая мощность P_2, кВт	7,5	160
Количество фаз статора m_1	3	3
Способ соединения фаз статора	Δ/Y	Δ/Y
Частота сети f, Гц	50	50
Номинальное линейное напряжение U, В	220/380	380/660
Синхронная частота вращения n_1, об/мин	1500	1000
Степень защиты от внешних воздействий	IP44	IP23
Способ охлаждения	IC0141	IC01
Исполнение по способу монтажа	IM1001	IM1001
Климатические условия и категория размещения	У3	У3
Вероятность безотказной работы обмотки за наработку 10 000 ч $P_{об}$	0,9	0,9
Форма выступающего конца вала	Цилиндрическая	
Способ соединения с приводным механизмом	Упругая муфта	
Количество пар полюсов p, по (9-1)	2	3

§ 9-3. Магнитная цепь двигателя.

Размеры, конфигурация, материал

Главные размеры. Проектирование асинхронных двигателей начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра D_1 и длины сердечника статора l_1. Как отмечалось в гл. 1, предельно допускаемая величина наружного диаметра корпуса $D_{корп}$ и сердечника статора $D_{н1}$ зависит от высоты оси вращения h. Если заданием на проектирование значение h не регламентировано, то его предварительно выбирают из табл. 9-1, данные которой соответствуют существующему в СССР и за рубежом среднему уровню привязки мощностей к h двигателей с разными степенями защиты и способами охлаждения.

В табл. 9-1 приведены также значения вращающего момента на валу M_2, поскольку в настоящее время широко распространена более удобная оценка привязки габаритов двигателя к моменту вращения, значение которого для данного типоразмера колеблется в относительно небольших пределах при исполнении двигателя с разным количеством полюсов (за исключением двигателей с $2p=2$).

Таблица 9-1

h, мм	P_2 (кВт) при синхронных частотах вращения, об/мин						M_2, Н·м (при 1500 об/мин)
	3000	1500	1000	750	600	500	
Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором исполнения по защите IP44, со способом охлаждения IC0141							
56	0,18	0,12	—	—	—	—	0,77
	0,25	0,18	—	—	—	—	1,15
63	0,37	0,25	0,18	—	—	—	1,59
	0,55	0,37	0,25	—	—	—	2,35
71	0,75	0,55	0,37	0,25	—	—	3,5
	1,1	0,75	0,55	—	—	—	4,74
80	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—	7,0
	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—	9,5
90	3	2,2	1,5	0,75	—	—	14
100	4	3	2,2	1,5	—	—	19
	5,5	4	—	—	—	—	25,4
112	7,5	5,5	3	2,2	—	—	35
	—	—	4	3	—	—	
132	11	7,5	5,5	4	—	—	47,4
	—	11	7,5	5,5	—	—	70
160	15	15	11	7,5	—	—	95,3
	18,5	18,5	15	11	—	—	118
180	22	22	18,5	15	—	—	140
	30	30	—	—	—	—	190
200	37	37	22	18,5	—	—	234,5
	45	45	30	22	—	—	284
225	55	55	37	30	—	—	349
250	75	75	45	37	—	—	474
	90	90	55	45	—	—	574
280	110	110	75	55	—	—	699
	132	132	90	75	—	—	838
315	160	160	110	90	55	45	1018
	200	200	132	110	75	55	1267
355	250	250	160	132	90	75	1592
	315	315	200	160	110	90	2006
400	—	315	250	200	—	—	2006
	—	400	315	250	200	—	2545
	—	500	400	—	—	—	3183
450	—	630	500	315	250	200	4012
	—	800	630	400	315	250	5094
	—	—	—	500	—	—	—
Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором исполнения по защите IP23, со способом охлаждения IC01							
160	22	18,5	11	7,5	—	—	118
	30	22	15	11	—	—	140
180	37	30	18,5	15	—	—	190
	45	37	22	18,5	—	—	235

h, мм	P_2 (кВт) при синхронных частотах вращения, об/мин						M_2, Н·м (при 1500 об/мин)
	3000	1500	1000	750	600	500	
200	55 75	45 55	30 37	22 30	— —	— —	284 349
225	90	75	45	37	—	—	474
250	110 132	90 110	55 75	45 55	— —	— —	574 699
280	160 200	132 160	90 110	75 90	— —	— —	838 1018
315	— 200	200 250	132 160	110 132	75 90	55 75	1267 1592
355	315 400	315 400	200 250	160 200	110 132	90 110	2005 2550
400	— — —	400 500 630	315 400 500	— 250 315	— 200 250	— — —	2550 3183 4010
450	— — —	800 1000 —	630 800 —	400 500 630	315 400 —	250 315 —	5093 6367 —

Асинхронные двигатели с фазным ротором исполнения по защите IP23, со способом охлаждения IC01

200	— —	37 45	22 30	18,5 22	— —	— —	235 284
225	— —	55 75	37 45	30 37	— —	— —	349 474
250	— —	90 110	55 75	45 55	— —	— —	574 699
280	— —	132 160	90 110	75 90	45 55	— —	838 1018
315	— —	200 250	132 160	110 132	75 90	55 75	1267 1592
355	— —	315 400	200 250	160 200	110 132	90 110	2006 2547
400	— — —	400 500 630	315 400 500	250 315 —	200 250 —	— — —	2547 3193 4012
450	— — —	800 1000 —	630 800 —	400 500 630	315 400 —	250 315 —	5094 6367 —

Примечание. Электродвигатели с $h \geqslant 400$ мм изготовляют на напряжение $U = 6000$ В.

Для удобства выбора наружного диаметра сердечника $D_{н1}$ при заданной или выбранной стандартной высоте оси вращения h в табл. 9-2 приведены предельно допустимые значения $D_{н1\,max}$ для $h=50\div450$ мм, указаны припуски на штамповку $\Delta_{шт}$, а также ширина резаных лент и стандартной рулонной стали, из которых штампуют листы сердечника.

Таблица 9-2

h, мм	h_1, мм	h_2, мм	$D_{н1max}$, мм	$\Delta_{шт}$, мм	Ширина (мм) при однорядной штамповке: резаных лент	рулонной стали	h, мм	h_1, мм	h_2, мм	$D_{н1max}$, мм	$\Delta_{шт}$, мм	Ширина (мм) при однорядной штамповке: резаных лент	рулонной стали
50	3	4	86	4	90	—	180	7	12	322	7	330	—
56	4	4	96	4	100	—	200	7	13,5	359	8	367	—
63	4	5	108	5	113	—	225	7	15	406	8	414	—
71	4	6	122	5	127	—	250	8	16	452	8	460	—
80	4	6,5	139	6	145	—	280	8	12	520	10	—	530
90	5	6,5	157	6	163	—	315	7	13	590	10	—	600
100	5	7,5	175	7	182	—	355	10	15	660	10	—	670
112	5	8,5	197	7	204	—	400	14	16	740	10	—	750
132	6	9,5	233	7	240	—	450	9	16	850	10	—	860
160	6	11,5	285	7	292	—							

При составлении табл. 9-2 имелось в виду, что двигатели с $h=50\div250$ мм выполняются с литыми станинами, а двигатели с $h=280\div450$ мм со сварными.

При $D_{н1}\leqslant452$ мм (что соответствует $h\leqslant250$ мм) листы статора штампуют из резаной ленты, которая по согласованию сторон может поставляться различной ширины, но не превышающей 500 мм. При $D_{н1}>452$ мм листы статора штампуют из рулонной стали стандартной ширины, указанной в § 2-3; соответственно принятые в этом случае значения h_1 могут несколько отличаться от указанных на рис. 1-1.

Для определения одного из главных размеров—внутреннего диаметра сердечника статора D_1 — можно использовать зависимости $D_1=f(D_{н1})$, приведенные в табл. 9-3. При проектировании части серии (двух двигателей и более на одном диаметре $D_{н1}$) для облегчения производства необходимо унифицировать при данном количестве полюсов основные

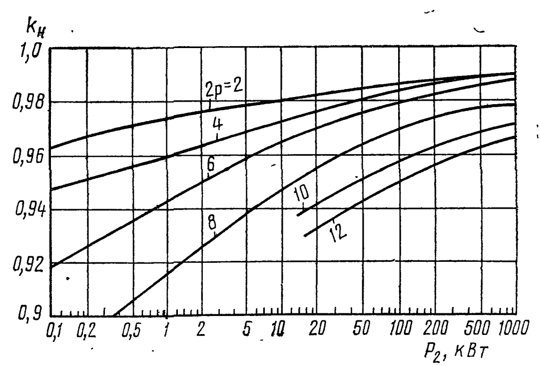


Рис. 9-1. Средние значения $k_н=f(P_2)$ асинхронных двигателей

Таблица 9-3

$2p$	$D_{н1}$, мм	$D_1 = f(D_{н1})$, мм
2	80 — 360 Свыше 360 — 750	$D_1 = 0{,}61\ D_{н1} - 4$ $D_1 = 0{,}485\ D_{н1} + 28$
4	80 — 520 Свыше 520 — 990	$D_1 = 0{,}68\ D_{н1} - 5$ $D_1 = 0{,}56\ D_{н1} + 60$
6	80 — 590 Свыше 590 — 990	$D_1 = 0{,}72\ D_{н1} - 3$ $D_1 = 0{,}6\ D_{н1} + 82$
8	80 — 590 Свыше 590 — 990	$D_1 = 0{,}72\ D_{н1} - 3$ $D_1 = 0{,}6\ D_{н1} + 100$
10 и 12	500 — 990	$D_1 = 0{,}6\ D_{н1} + 110$

размеры магнитопровода двигателя в его поперечном сечении— диаметры $D_{н1}$, D_1, $D_{н2}$, а также количество и размеры пазов статора и ротора.

Расчетную мощность P' определяют по (1-11). Значение $k_н$ находят из рис. 9-1.

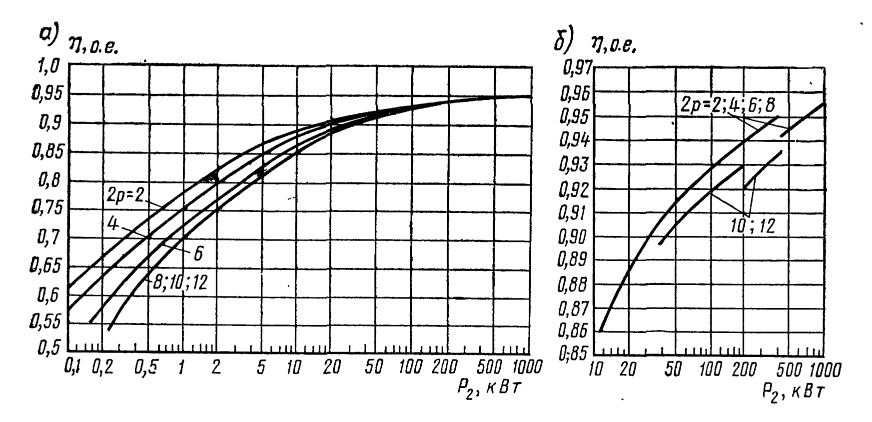


Рис. 9-2. Средние значения $\eta = f(P_2)$ асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:

а — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141; *б* — исполнение по защите IP23, способ охлаждения IC01

Предварительные значения η' и $\cos\varphi'$ для двигателей с короткозамкнутым ротором могут быть приняты на уровне средних энергетических показателей выпускаемых электродвигателей (рис. 9-2 и 9-3) или по ГОСТ 19523—74 *. Для двигателей с фазным ротором исполнения по защите IP23 предварительные значения η' могут быть приняты на 0,005 ниже, чем по рис. 9-2, а $\cos\varphi$ на 0,01 ниже, чем по рис. 9-3.

* Здесь и далее предварительные значения параметров обозначаются знаком «штрих» для отличия от уточняемых в дальнейшем значений.

Для определения второго главного размера — длины сердечника статора l_1 — вначале по (1-30) находят расчетную длину сердечника l'_1 (с соответствующим округлением). При этом следует задать предварительные значения обмоточного коэффициента $k'_{об1}$ ($k'_{об1}=0{,}91 \div 0{,}94$ для $2p \geqslant 4$; $k'_{об1}=0{,}79$ для $2p=2$; большие значения $k'_{об1}$ принимают для двигателей меньшей мощности), а также электромагнитных нагрузок A'_1 и B'_δ (значения A'_1 и B'_δ зависят от ряда факторов, в том числе от формы пазов и типа обмотки). В табл. 9-4 указаны применяемые в настоящее время формы пазов и типы обмоток статора.

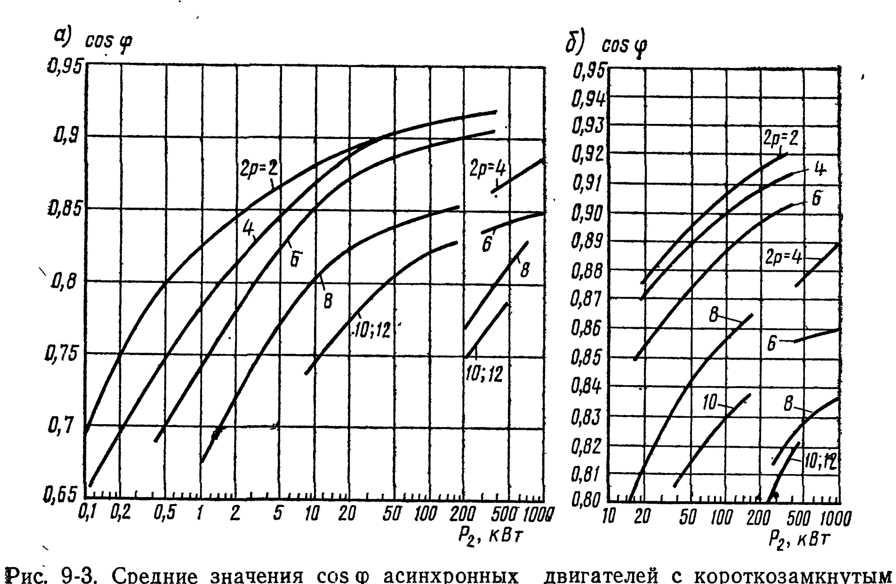


Рис. 9-3. Средние значения cos φ асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:

а — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141; *б* — исполнение по защите IP23, способ охлаждения IC01

Таблица 9-4

Высота оси вращения h, мм	Форма паза	Тип обмотки
50 — 160	Трапецеидальные полузакрытые	Однослойная всыпная концентрическая
180 — 250 280 — 315 ($2p=10$; 12)	То же »	Двухслойная или одно-двухслойная всыпная
280 — 355 ($2p=2$; 4; 6; 8) 355 ($2p=10$; 12)	Прямоугольные полуоткрытые То же	Двухслойная из жестких катушек То же
400 — 450	Прямоугольные открытые	Двухслойная из жестких катушек

Форма пазов, указанная в таблице, определяется тем, что статоры с прямоугольными (открытыми или полуоткрытыми) пазами обладают большей надежностью обмотки, выполняемой из жестких изолированных катушек, а также большим коэффициентом заполнения пазов медью проводов прямоугольного поперечного сечения. Однако со снижением h возникают технологические затруднения, ограничивающие возможность применения прямоугольных пазов статора, из-за уменьшения поперечного сечения проводов и ширины зубца в наиболее узком месте.

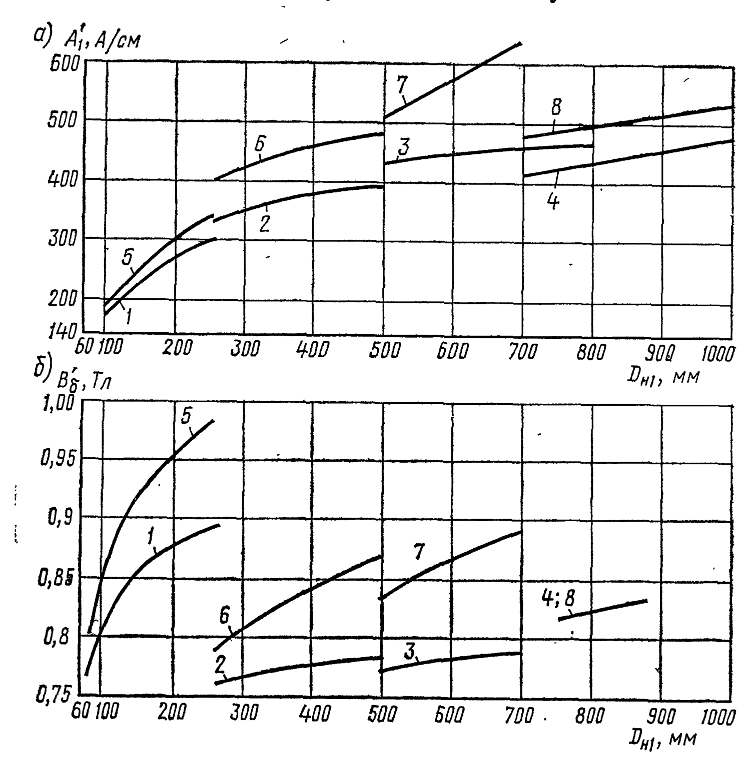


Рис. 9-4. Средние значения $A'_1=f(D_{н1})$ (*а*), $B'_\delta=f(D_{н1})$ (*б*) при $2p=4$ и классе нагревостойкости F:

1 — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141, полузакрытые пазы однослойная обмотка; *2* — то же, что *1*, но двухслойная обмотка; *3* — IP44, IC0141, полузакрытые пазы, двухслойная обмотка, продуваемый ротор; *4* — IP44, IC0141, открытые пазы, $U=6000$ В, двухслойная обмотка; *5* — IP23, IC01, полузакрытые пазы, однослойная обмотка; *6* — то же, что *5*, но двухслойная обмотка; *7* — IP23, IC01, полуоткрытые пазы, двухслойная обмотка; *8* — IP23, IC01, открытые пазы, $U=6000$ В, двухслойная обмотка

Поэтому в асинхронных двигателях, начиная примерно с $D_{н1} \leqslant 452$ мм (что соответствует $h \leqslant 250$ мм), выполняют полузакрытые пазы трапецеидальной формы со всыпной обмоткой из проводов круглого поперечного сечения, при которых коэффициент заполнения паза медью снижается. Компенсирует в некоторой степени указанное снижение возможность получения зубцов равновеликого сечения и постоянства магнитной индукции по

высоте зубца, в отличие от прямоугольных пазов, при которых зубец имеет трапецеидальную форму и магнитную индукцию, увеличивающуюся в направлении основания паза.

На рис. 9-4 приведены средние значения A'_1 и B'_δ для асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным роторами при $2p=4$ и с изоляцией класса нагревостойкости F. При количестве полюсов, отличающихся от $2p=4$, принимаемые из рис. 9-4 значения A'_1 и B'_δ умножают на поправочные коэффициенты k_1 и k_2 (табл. 9-5). Кроме того, при выполнении электродвигателей с изоляцией классов нагревостойкости В или Н значение A'_1, принятое по рис. 9-4 с учетом k_1, должно быть умножено на поправочный коэффициент k_3 (для класса В—$k_3=0{,}86$; для класса Н—$k_3=1{,}14$).

Таблица 9-5

Коэффициенты	Степень защиты, способ охлаждения	$D_{н1}$, мм	Коэффициенты при различных значениях $2p$			
			2	6	8	10 и 12
k_1 (для A'_1)	IP44, IC0141	80 — 250	0,93	1,0	1,0	—
		Свыше 250 — 500	1,1	0,93	0,93	—
		» 500 — 700	1,1	0,915	0,915	0,84
		» 700 — 990	—	0,92	0,87	0,84
	IP23, IC01	» 250 — 500	1,16	0,9	0,84	0,72
		» 500 — 700	1,15	0,89	0,84	0,72
		» 700 — 990	—	0,9	0,88	0,85
k_2 (для B'_δ)	IP44, IC0141	80 — 250	1,0	1,0	1,2	—
		Свыше 250 — 700	0,96	1,04	1,04	1,04
		» 700 — 990	—	0,96	0,94	0,92
	IP23, IC01	» 250 — 700	0,98	1,02	1,02	1,04
		» 700 — 990	—	0,97	0,94	0,925

Следует иметь в виду, что при современных высоких требованиях к величинам пусковых моментов электродвигателей с $h\leqslant 132$ мм может возникнуть необходимость проектирования двигателей с пониженными значениями A'_1.

Конструктивная длина сердечника статора l_1 при отсутствии в сердечнике радиальных вентиляционных каналов равна расчетной длине l'_1, округленной до ближайшего целого числа (при длине менее 100 мм) и до ближайшего числа, кратного пяти (при длине более 100 мм); соответственно изменяется значение l_1. При длине сердечника более 300—350 мм применяются радиальные вентиляционные каналы. В этом случае l_1 определяется по (1-33) с округлением до ближайшего числа, кратного пяти. Количество вентиляционных каналов $n_{к1}$ определяется длиной

одного пакета сердечника статора $l_{п1}$, выбираемой в пределах 55—75 мм при длине вентиляционного канала $l_{к1}=10$ мм. Отношение

$$\lambda=l_1/D_1 \qquad (9\text{-}2)$$

целесообразно выбирать таким, чтобы оно приближалось к предельному допускаемому отношению λ_{max}, вычисляемому для дви-

Таблица 9-6

Степень защиты, способ охлаждения	$D_{н1}$, мм	Значения λ_{max}
IP44, IC0141	80—700	$1,46-0,00071D_{н1}$
IP23, IC01	250—700	$1,33-0,00087D_{н1}$
IP44, IC0141, IP23, IC01	Свыше 700—990	$1,56-0,00088D_{н1}$

гателей с $2p=4$ по формулам, приведенным в табл. 9-6. При количестве полюсов, отличающихся от $2p=4$, значение λ_{max}, полученное из табл. 9-6, должно быть умножено на поправочный коэффициент k_4 для электродвигателей со степенями защиты IP23 и IP44 (табл. 9-7).

Таблица 9-7

$D_{н1}$, мм	Коэффициенты k_4 при различных значениях $2p$		
	2	6	8, 10 и 12
80—700	0,95	1,05	1,1
Свыше 700—990	—	—	1,15

Если λ превышает λ_{max}, то, как указано в § 1-3, необходимо перейти на другую, большую стандартную высоту оси вращения и повторить расчет главных размеров и λ.

При проектировании участка серии с двумя или тремя длинами сердечника статора на одном диаметре значение λ электродвигателя большей мощности должно приближаться к λ_{max}, но не превышать его; значение λ электродвигателя меньшей мощности не регламентируется. В отдельных случаях, например у тихоходных машин, значение λ_{max} может быть увеличено по сравнению с рекомендуемыми по табл. 9-6 и 9-7, но с соответствующей проверкой механической жесткости и прочности вала.

Сердечник статора. Сердечник собирают из отдельных отштампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, имеющих изоляционные покрытия для уменьшения потерь в стали от вихревых токов. Для сердечников рекомендуется применять следующие марки холоднокатаной изотропной электротехнической стали:

Высота оси вращения, мм	50—250	280—355	400—450
Марка стали	2013	2312	2411

Для стали 2013 обычно используют изолирование листов оксидированием (коэффициент заполнения стали $k_c=0,97$), для стали 2312 и 2411 — лакировкой ($k_c=0,95$) или термостойким электроизоляционным покрытием листов ($k_c=0,96\div0,97$).

Количество пазов сердечника статора

$$z_1=2pm_1q_1 \quad (9\text{-}3)$$

зависит от выбранного количества пазов на полюс и фазу

$$q_1=z_1/(2pm_1). \quad (9\text{-}4)$$

Обычно q_1 выбирают равным целому числу. Только для унификации листов статора двигателей с разным количеством полюсов и для тихоходных двигателей иногда применяют дробное q_1 (1,5; 2,5 и др.). В табл. 9-8 приведены рекомендуемые значения q_1.

Таблица 9-8

$2p$	Количество пазов на полюс и фазу q_1 при различных значениях h, мм		
	50 — 132	160 — 225	250 — 450
2	3; 4	5; 6	7; 8
4	2; 3	3; 4	4; 5
6	2; 3	3; 4	4; 5
8	1,5; 2	2; 3	3; 4
10	—	—	2; 3
12	—	—	2; 2,5

По выбранному значению q_1 определяют z_1 в соответствии с (9-3). При этом целесообразно использовать опыт по серии 4А (см. табл. 9-12).

Сердечник ротора. Сердечник собирают из отдельных отштампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Марки стали и изоляционные покрытия такие же, как в статоре.

В короткозамкнутом роторе применяют закрытые, полузакрытые и открытые пазы. Для уменьшения влияния моментов высших гармоник на пусковые и виброаккустические характеристики машин роторы двигателей с высотами оси вращения $h\leqslant160$ мм имеют скос пазов $b_{ск1}$ на одно зубцовое деление статора t_1; при этом $\beta_{ск1}=1$. Двигатели с бо́льшими высотами оси вращения обычно выполняют без скоса пазов.

Наружный диаметр сердечника ротора (мм)

$$D_{н2}=D_1-2\delta, \quad (9\text{-}5)$$

где δ — воздушный зазор между статором и ротором, мм.

Величину воздушного зазора выбирают с учетом противоречивых требований, так как, с одной стороны, при увеличении воздушного зазора уменьшается коэффициент мощности, а с другой — увеличиваются фактический КПД и надежность двигателя, снижается нагрев обмоток, уменьшаются добавочные потери, уровень шума и вибраций магнитного происхождения, возможность задевания ротора о статор.

Таблица 9-9

h, мм	δ (мм) при различных значениях $2p$: 2	4	6 и 8	10 и 12	h, мм	δ (мм) при различных значениях $2p$: 2	4	6 и 8	10 и 12
50	0,25	0,25	0,25	—	180	1,0	0,6	0,45	—
56	0,3	0,25	0,25	—	200	1,0	0,7	0,5	—
63	0,35	0,25	0,25	—	225	1,0	0,85	0,6	—
71, 80	0,35	0,25	0,25	—	250	1,2	1,0	0,7	—
90	0,4	0,25	0,25	—	280	1,3	1,0	0,8	0,7
100	0,45	0,3	0,3	—	315	1,5	1,0	0,9	0,8
112	0,5	0,3	0,3	—	355	1,8	1,2	1,0	0,9
132	0,6	0,35	0,35	—	400	2,0	1,4	1,2	1,0
160	0,8	0,5	0,5	—	450	2,0	1,4	1,2	1,0

В табл. 9-9 приведены средние значения воздушного зазора δ, принятые в современных сериях асинхронных двигателей.

Для высот осей вращения $h \geqslant 71$ мм внутренний диаметр листов ротора

$$D_2 \approx 0{,}23 D_{н1}; \qquad (9\text{-}6)$$

для высот осей вращения $h = 50$ и 63 мм

$$D_2 \approx 0{,}19 D_{н1}. \qquad (9\text{-}7)$$

После расчета вала на жесткость размер D_2 уточняют.

Для улучшения охлаждения, уменьшения массы и динамического момента инерции ротора в сердечниках ротора с $h \geqslant 250$ мм предусматривают круглые аксиальные вентиляционные каналы в соответствии с данными табл. 9-10. У двигателей с меньшей высотой оси вращения аксиальные каналы обычно не предусматривают из-за повышения при этом магнитной индукции в спинке ротора.

Таблица 9-10

h, мм	Количество $n_{к2}$ и диаметр $d_{к2}$ (мм) вентиляционных каналов при различных значениях $2p$							
	2		4		6		8, 10 и 12	
	$n_{к2}$	$d_{к2}$	$n_{к2}$	$d_{к2}$	$n_{к2}$	$d_{к2}$	$n_{к2}$	$d_{к2}$
250	10	15	10	20	10	30	10	30
280	12	20	12	32	12	40	12	40
315	12	20	12	40	12	40	12	40
355	12	20	12	50	12	50	12	50
400	—	—	9	55	9	65	9	75
450	—	—	9	65	9	75	9	90

Длину сердечника ротора l_2 принимают равной длине сердечника статора l_1 для $h \leqslant 250$ мм, а для $h > 250$ мм $l_2 = l_1 + 5$ мм. Радиальные вентиляционные каналы в роторе выполняют при $l_2 > 350$ мм. Количество, размеры и расположение этих каналов в роторе такое же, как в сердечнике статора.

Количество пазов z_2 для двигателей с короткозамкнутым ротором выбирают в зависимости от z_1 и наличия скоса пазов в

Таблица 9-11

2p	z_1	z_2	
		пазы без скоса	пазы со скосом
1	2	3	4
2	18	15, 21, 22	19, 22, 26, 28, 31, 33, 34, 35
	24	15, 17, 19, 32	19, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	20, 21, 23, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 28, 29, 43, 45, 47
	42	32, 34, 50, 52	—
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
4	24	16, 17	16, 18, 28, 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 38, 44, 46	27, 28, 30, 34, 38, 45, 48
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	38, 40, 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36	26, 46	28, 33, 47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 51, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	36	—	28
	48	36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, 70, 98, 100, 102, 104	—
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	108, 110	—
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104	99, 101, 103, 117, 123, 137
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	86, 87, 93, 94
			—
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112

роторе. В табл. 9-11 приведены рекомендуемые количества пазов z_2. Соотношения получены в результате теоретических и экспериментальных исследований. Отступление от рекомендованных соотношений z_1/z_2 может привести к недопустимым провалам в характеристике пускового момента, к повышенным шумам и вибрациям.

Количество пазов в сердечнике ротора для двигателей с фазным ротором

$$z_2=2pm_2q_2 \tag{9-8}$$

зависит от выбранного количества пазов на полюс и фазу ротора q_2. Обычно (если это не оговорено в исходных данных) принимают $m_2=m_1$ и $q_2=q_1\pm1$. Если при этом q_2 получается слишком большим или малым, то принимают $q_2=q_1\pm0{,}5$.

В табл. 9-12 приведены соотношения количества пазов z_1/z_2, принятые в серии 4А.

Таблица 9-12

h, мм	z_1/z_2 при различном $2p$					
	2	4	6	8	10	12
Двигатели с короткозамкнутым ротором						
50—63	24/19	24/18	36/28	—	—	—
71	24/19	24/18	36/28	36/28	—	—
80—100	24/19	36/28	36/28	36/28	—	—
112—132	24/19	36/34	54/51	48/44	—	—
160	36/28	48/38	54/51	48/44	—	—
180—200	36/28	48/38	72/58	72/58	—	—
225	36/28	48/38	72/56	72/56	—	—
250	48/40	60/50	72/56	72/56	—	—
280—355	48/38	60/70	72/82	72/86	90/106	90/106
400—450	—	60/70	72/84	72/86	90/106	90/106
Двигатели с фазным ротором						
200	—	48/36	72/54	72/48	—	—
225	—	48/66	72/81	72/84	—	—
250	—	60/72	72/81	72/84	—	—
280—355	—	60/72	72/81	72/84	90/120	90/108
400—450	—	60/72	72/90	72/96	90/120	90/126

Примеры расчета машин

2. Магнитная цепь двигателя. Размеры, конфигурация, материал

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
Принимаем для двигателя № 1 изоляцию класса нагревостойкости В, а для двигателя № 2 — класса F				
Главные размеры				
1	h, мм	табл. 9-1	132	—
2	h, мм	табл. 9-1	—	315
3	$D_{н1}$, мм	табл. 9-2	233	590
4	D_1, мм	табл. 9-3	$0{,}68\cdot 233 - 5 = 153$	$0{,}72\cdot 590 - 3 = 424$
5	$k_н$	рис. 9-1	0,97	0,98
6	η', о. е.	рис. 9-2, *а*	0,87	—
7	η', о. е.	рис. 9-2, *б*	—	$0{,}935 - 0{,}005 = 0{,}93$
8	$\cos\varphi'$, о. е	рис. 9-3, *а*	0,86	—
9	$\cos\varphi'$, о. е.	рис. 9-3, *б*	—	$0{,}89 - 0{,}01 = 0{,}88$
10	P', Вт	(1-11)	$0{,}97\dfrac{7{,}5\cdot 10^3}{0{,}87\cdot 0{,}86} = 9723$	$0{,}98\dfrac{160\cdot 10^3}{0{,}93\cdot 0{,}88} = 191\,600$
11	A'_1, А/см	рис. 9-4, *а* табл. 9-5	$296\cdot 0{,}86 = 255$	$565\cdot 0{,}89 = 503$
12	B'_δ, Тл	рис. 9-4, *б* табл. 9-5	0,885	$0{,}858\cdot 1{,}02 = 0{,}875$
13	$k'_{об1}$	§ 9-2	0,94	0,93
14	l'_1, мм	(1-30)	$\dfrac{8{,}62\cdot 10^7\cdot 9723}{153^2\cdot 1500\cdot 255}\times\dfrac{1}{0{,}885\cdot 0{,}94} = 112{,}5$	$\dfrac{8{,}62\cdot 10^7\cdot 191\,600}{424^2\cdot 1000\cdot 503\cdot 0{,}875}\times\dfrac{1}{0{,}93} = 226{,}6$
15	l_1, мм	§ 9-2	115	225
16	λ	(9-2)	$115/153 = 0{,}75$	$225/424 = 0{,}53$
17	λ_{max}	табл. 9-6 табл. 9-7	$1{,}46 - 0{,}00071\times 233 = 1{,}3$	$1{,}05(1{,}33 - 0{,}00087\times 590) = 0{,}86$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
		Сердечник статора		
18	Марка стали		2013	2312
19	Толщина стали, мм		0,5	0,5
20	Изолировка		Оксидирование	Лакировка
21	k_c	§ 9-3	0,97	0,95
22	q_1	табл. 9-8 табл. 9-12	3	4
23	z_1	(9-3)	$4 \cdot 3 \cdot 3 = 36$	$6 \cdot 3 \cdot 4 = 72$
		Сердечник ротора		
24	Марка стали		2013	2312
25	Толщина стали, мм		0,5	0,5
26	Изолировка		Оксидирование	Лакировка
27	k_c	§ 9-3	0,97	0,95
28	$\beta_{ск}$	§ 9-3	1,0	—
29	δ, мм	табл. 9-9	0,35	0,9
30	$D_{н2}$, мм	(9-5)	$153 - 2 \cdot 0,35 = 152,3$	$422 - 2 \cdot 0,9 = 420,2$
31	D_2, мм	(9-6)	$0,23 \cdot 233 = 54$	$0,23 \cdot 590 = 140$
32	$n_{к2}$	табл. 9-10	—	12
33	$d_{к2}$, мм	табл. 9-10	—	40
34	l_2, мм	§ 9-3	115	$225 + 5 = 230$
35	q_2, мм	§ 9-3	—	$4 + 0,5 = 4,5$
36	z_2	табл. 9-12 (9-8)	34	$6 \cdot 3 \cdot 4,5 = 81$

§ 9-4. Обмотка статора

Типы обмоток и общие положения. В асинхронных двигателях с $h \leqslant 160$ мм обычно выполняют однослойные всыпные обмотки, а в двигателях с $h > 160$ мм — двухслойные (из мягких секций или из жестких катушек). В табл. 9-4 указаны типы используемых обмоток и соответственно форма пазов. При выполнении двигателей с однослойными обмотками облегчается применение автоматических обмоточных станков, а при изготовлении их с двухслойными обмотками с укороченным шагом — улучшается форма кривой поля и уменьшается расход меди на лобовые части обмотки. Однослойную обмотку выполняют концентрической. Для механизации обмоточных работ в электродвигателях с $h > 160$ мм используют разносекционные одно- и двухслойные концентрические обмотки [см. 8; 20].

Высоковольтные электродвигатели выполняют с открытыми пазами. По высоте паза укладывают две катушки, а прямоугольные проводники располагают плашмя. Конструкция обмоток статора описана в § 3-13. Основные свойства разных типов обмотки статора, в том числе условия их симметрии, подробно освещены

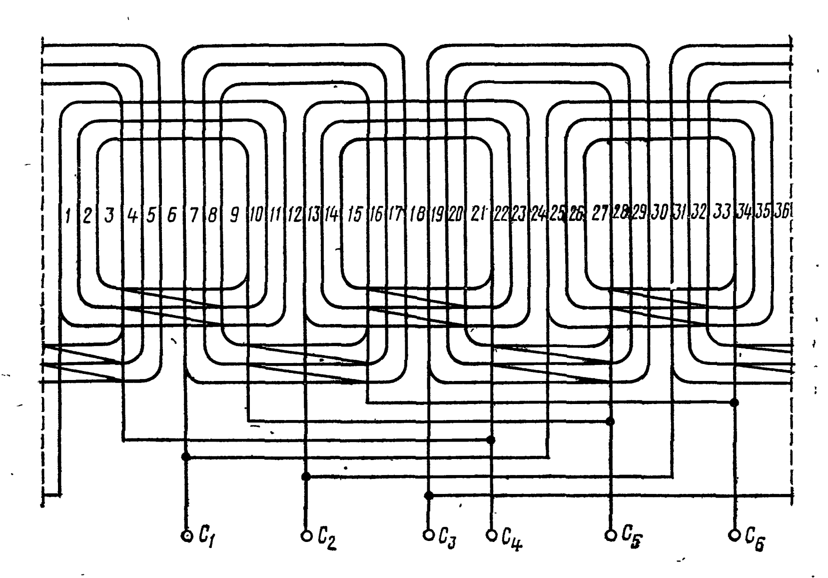


Рис. 9-5. Схема трехфазной однослойной концентрической обмотки статора $Z_1=36$; $2p=4$; $q_1=3$; $y_{п1}=7,\ 9,\ 11$

Рис. 9-6. Схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки статора $Z_1=18$; $2p=2$; $q_1=3$; $y_{п1}=7$

в [8; 20]. На рис. 9-5 показаны схема трехфазной однослойной концентрической обмотки статора, а на рис. 9-6 — схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки статора. Обычно обмотку статора выполняют шестизонной; каждая зона равна 60 эл. град. При шестизонной обмотке коэффициент распределения

$$k_{p1}=0{,}5/[q_1 \sin(\alpha/2)], \quad (9\text{-}9)$$

где $\alpha=60°/q_1$.

Однослойную обмотку выполняют с диаметральным шагом по пазам

$$y_{п1}=z_1/(2p). \quad (9\text{-}10)$$

Двухслойную обмотку выполняют с укороченным шагом

$$y_{п1}=\beta_1 z_1/(2p). \quad (9\text{-}11)$$

Укорочение шага β_1 выбирают таким образом, чтобы $y_{п1}$ равнялось целому числу, а $\beta_1\approx0{,}6$ при $2p=2$ или $\beta_1\approx0{,}8$ при $2p\geqslant4$.

Коэффициент укорочения

$$k_{y1}=\sin(\beta_1\cdot90°). \quad (9\text{-}12)$$

При однослойной обмотке с диаметральным шагом $\beta_1=1$.

Обмоточный коэффициент

$$k_{об1}=k_{p1}k_{y1}. \quad (9\text{-}13)$$

Предварительное значение магнитного потока (Вб)

$$\Phi'=B'_\delta D_1 l'_1 10^{-6}/p, \quad (9\text{-}14)$$

где l'_1 — округленное значение расчетной длины сердечника статора; при отсутствии радиальных вентиляционных каналов l'_1 принимается равным l_1.

Предварительное количество витков в обмотке фазы

$$w'_1=k_н U_1/[222k_{об1}(f_1/50)\Phi']. \quad (9\text{-}15)$$

Предварительное количество эффективных проводников в пазу

$$N'_{п1}=w'_1 a_1/(pq_1), \quad (9\text{-}16)$$

где a_1 — количество параллельных ветвей обмотки статора, которое должно быть одним из делителей числа полюсов, например при $2p=12$ возможные значения $a_1=1$; 2; 3; 4; 6.

Параллельные ветви обмотки должны содержать одинаковое количество витков, а стороны катушек — находиться в магнитном поле в одинаковых условиях. При малом значении $N'_{п1}$ и вызванных этим трудностях с расположением проводов в пазу увеличение значения a_1 позволяет соответственно повысить $N'_{п1}$. Полученное из (9-16) $N'_{п1}$ округляют до ближайшего целого числа $N_{п1}$. При двухслойной обмотке $N_{п1}$ должно быть выбрано, как правило, четным. Однако при малых значениях $N_{п1}$, например $N_{п1}=6$; 8, иногда приходится выбирать $N_{п1}$ нечетным. При этом катушки имеют разное количество проводников, отличающееся на единицу. Применяя обмотки с разновитковыми катушками, следует обращать внимание на необходимость образования симметричных параллельных ветвей.

Выбрав целое число $N_{п1}$, уточняют предварительно установленные параметры w'_1, A'_1 и B'_δ:

$$w_1 = N_{п1} p q_1 / a_1. \quad (9\text{-}17)$$

Уточнённое значение магнитного потока (Вб)

$$\Phi = \Phi' w'_1 / w_1. \quad (9\text{-}18)$$

Уточненное значение индукции в воздушном зазоре (Тл)

$$B_\delta = B'_\delta w'_1 / w_1. \quad (9\text{-}19)$$

Предварительное значение номинального фазного тока (А)

$$I_1 = P_2 \cdot 10^3 / (3 U_1 \eta' \cos\varphi'). \quad (9\text{-}20)$$

Уточненная линейная нагрузка статора (А/см)

$$A_1 = 10 N_{п1} z_1 I_1 / (\pi D_1 a_1). \quad (9\text{-}21)$$

Полученное по (9-21) значение A_1 не должно отличаться от предварительно принятого A'_1 более чем на 10%; иначе следует изменить количество витков w_1.

Таблица 9-13

h, мм	$2p$	B_{c1}, Тл
50—250	2; 4 6 8	1,55—1,75 1,4—1,6 1,1—1,3
280—355	2; 4; 6; 8 10; 12	1,45—1,65 1,2—1,4
400—450	4; 6; 8 10; 12	1,3—1,5 1,1—1,3

Таблица 9-14

h, мм	$2p$	$B_{з1}$ для двигателей со степенью защиты, Тл	
		IP44	IP23
50—132	2; 4; 6; 8	1,75—1,95	1,8—2,0
160—250	2 4; 6; 8	1,75—1,95 1,6—1,8	1,9—2,1 1,7—1,9
280—315	10; 12	1,6—1,8	1,7—1,9

Проектирование обмотки ведут при одновременном определении размеров зубцовой зоны. Для определения высоты паза сначала находят высоту спинки статора h_{c1}. Средние значения магнитной индукции в спинке статора B_{c1} приведены в табл. 9-13.

Зубцовое деление по внутреннему диаметру статора (мм)

$$t_1 = \pi D_1 / z_1. \quad (9\text{-}22)$$

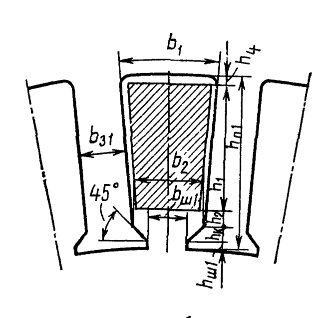


Рис. 9-7. Трапецеидальный полузакрытый паз статора

Обмотка статора с трапецеидальными полузакрытыми пазами. Полузакрытые пазы статора обычно имеют трапецеидальную форму (рис. 9-7), при этом размеры b_1 и b_2 выбирают такими, чтобы стенки зубцов были параллельными ($b_{з1}$=const). Постоянство магнитной индукции по высоте зубца уменьшает МДС на участке зубца. Кроме того, при полузакрытых пазах коэффициент воздушного зазора и добавочные потери меньше, чем при открытых пазах или полуоткрытых.

Недостаток полузакрытых трапецеидальных пазов заключается в том, что в них укладывают всыпную обмотку из круглого провода. Это понижает коэффициент заполнения паза и надежность обмотки. Для определения ширины зубца $b_{з1}$ следует принять средние значения магнитной индукции в зубцах статора $B_{з1}$ по табл. 9-14. Ширина зубца (мм)

$$b_{з1}=t_1 B_\delta/(k_c B_{з1}). \qquad (9\text{-}23)$$

При сборке сердечника размеры пазов в штампе и в свету (после сборки сердечника) не совпадают из-за неизбежного смещения листов друг относительно друга. Припуски на сборку сердечников статора и ротора электродвигателей с $h=50\div132$ мм по ширине b_c и по высоте h_c составляют 0,1 мм; с $h=160\div250$ мм b_c и $h_c=0{,}2$ мм; с $h=280\div355$ мм b_c и $h_c=0{,}3$ мм; с $h=400\div450$ мм b_c и $h_c=0{,}4$ мм.

Размеры трапецеидальных пазов определяют в такой последовательности:

Высота спинки статора (мм)	$h_{c1}=\Phi\cdot10^6/(2k_c l_1 B_{c1})$	(9-24)
Высота паза (мм)	$h_{п1}=[(D_{н1}-D_1)/2]-h_{c1}$	(9-25)
Бóльшая ширина паза (мм)	$b_1=[\pi(D_1+2h_{п1})/z_1]-b_{з1}$	(9-26)
Меньшая ширина паза (мм)	$b_2=[\pi(D_1+2h_{ш1}-b_{ш1})-z_1 b_{з1}]/(z_1-\pi)$	(9-27)
Проверка правильности определения b_1 и b_2 исходя из требования $b_{з1}=$ =const	Условие: $z_1(b_1-b_2)+\pi(b_2-b_{ш1})-$ $-2\pi(h_{п1}-h_{ш1})\approx0$	(9-28)
Площадь поперечного сечения паза в штампе (мм²)	$S_{п1}=\frac{b_1+b_2}{2}\left(h_{п1}-h_{ш1}-\frac{b_2-b_{ш1}}{2}\right)$	(9-29)
Площадь поперечного сечения паза в свету (мм²)	$S'_{п1}=\left(\frac{b_1+b_2}{2}-b_c\right)\left(h_{п1}-h_{ш1}-\frac{b_2-b_{ш1}}{2}-h_c\right)$	(9-30)
Площадь поперечного сечения корпусной изоляции (мм²)	$S_и=b_{и1}(2h_{п1}+b_1+b_2)$	(9-31)
Площадь поперечного сечения прокладок между верхней и нижней катушками в пазу, на дне паза и под клином (мм²)	$S_{пр}=0{,}5b_1+0{,}75b_2$	(9-32)
Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой (мм²)	$S''_{п1}=S'_{п1}-S_и-S_{пр}$	(9-33)

Здесь $h_{ш1}=0{,}5$ мм — высота шлица; $b_{ш1}$ — ширина шлица, мм; $b_{и1}$ — среднее значение односторонней толщины корпусной изоляции:

h, мм	50—80	90—132	160—250	280—315
$b_{и1}$, мм	0,2	0,25	0,4	0,58

Предварительное значение ширины шлица

$$b'_{ш1}\approx0{,}3\sqrt{h}. \qquad (9\text{-}34)$$

После выбора диаметра изолированного обмоточного провода d' определяют значение $b''_{ш1}$ по (9-38) и вносят при необходимости коррективы в расчеты по формулам (9-27)—(9-30).

Для обмоток статора применяют провода марки ПЭТВ (класс нагревостойкости В), провода ПЭТ-155 (класс F) и ПЭТ-200 (класс Н). При механизации обмоточных работ применяют провода с механически более прочной изоляцией марок ПЭТВМ, ПЭТМ-155 и ПЭТМ-200 соответственно.

Диаметр провода выбирают таким, чтобы коэффициент заполнения паза $k_п$ не превышал 0,75 (при ручной укладке) и 0,72 (при машинной на статорообмоточных станках). Коэффициент заполнения паза

$$k_п = N_{п1} c (d')^2 / S_{п1}'', \tag{9-35}$$

где c — количество элементарных проводов в эффективном; d' — диаметр элементарного изолированного провода, мм.

Задавшись $k_п$, определяют произведение

$$c (d')^2 = k_п S_{п1}'' / N_{п1}. \tag{9-36}$$

Число c выбирают, исходя из условия, чтобы диаметр провода с изоляцией d' не превышал 1,71 мм при ручной укладке и 1,33 мм при машинной. Причина этого ограничения заключается в затруднении с укладкой проводов большего диаметра в пазы.

При значениях $k_п$, бóльших допустимого, увеличиваются механические воздействия при укладке обмотки в пазы и в связи с этим возрастает опасность повреждения изоляции проводов при укладке. При значениях $k_п < 0{,}65$ в связи с повышением плотности тока в пазу увеличивается температура обмотки. Это может привести к необходимости удлинения сердечников статора и ротора. Кроме того, для уплотнения обмотки в пазу потребуются утолщенные клинья.

Из (9-35) диаметр элементарного изолированного провода (мм)

$$d' = \sqrt{k_п S''_{п1} / (N_{п1} c)}. \tag{9-37}$$

По приложению 1 находим ближайший стандартизованный диаметр d', соответствующий ему диаметр неизолированного провода d и площадь поперечного сечения S. После этого уточняют коэффициент заполнения паза по (9-35) и ширину шлица (мм)

$$b_{ш1}'' = d' + 2b_и + 0{,}4. \tag{9-38}$$

Если окажется, что $b_{ш1}' > b_{ш1}''$, то принимают $b_{ш1} = b_{ш1}'$; если $b_{ш1}' < b_{ш1}''$, то принимают $b_{ш1} = b_{ш1}''$.

Плотность тока в обмотке статора (А/мм²)

$$J_1 = I_1 / (c S a_1). \tag{9-39}$$

Уровень удельной тепловой нагрузки статора от потерь в обмотке в значительной мере определяет ожидаемое превышение температуры обмотки; как показано в § 5—4, этот уровень характеризуется произведением линейной нагрузки на плотность тока в обмотке $A_1 J_1$.

У проектируемой обмотки статора находят указанное произведение и сравнивают его со средним допускаемым значением из

рис. 9-8, соответствующим исполнению с изоляцией класса нагревостойкости F и с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. При изоляции классов нагревостойкости В и Н, а также при частотах вращения, отличающихся от 1500 об/мин, принимаемое из рисунка значение $(A_1J_1)_{доп}$ умножают на коэффициент 0,75 (для класса В) или на 1,3 (для класса Н) и на коэффициент k_5 (табл. 9-15), учитывающий изменение эффекта охлаждения обмотки и влияния его на $(A_1J_1)_{доп}$ при различных частотах вращения.

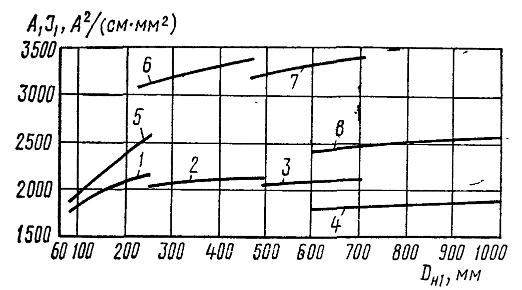


Рис. 9-8. Средние допустимые значения $A_1J_1=f(D_{н1})$ при классе нагревостойкости F и $2p=4$:

1 — исполнение по защите — IP44, способ охлаждения IC0141, полузакрытые пазы, однослойная обмотка; *2* — то же, что *1*, но двухслойная обмотка; *3* — IP44, IC0141, полуоткрытые пазы, двухслойная обмотка, продуваемый ротор; *4* — IP44; IC0161, открытые пазы, $U=6000$ В, двухслойная обмотка; *5* — IP23, IC01, полузакрытые пазы, однослойная обмотка; *6* — то же, что *5*, но двухслойная обмотка; *7* — IP23, IC01, полуоткрытые пазы, двухслойная обмотка; *8* — IP23, IC01, открытые пазы, $U=6000$ В, двухслойная обмотка

Если полученный при расчете двигателя показатель A_1J_1 превышает допускаемое значение более чем на 15%, то следует либо повысить площади поперечных сечений провода и паза $S''_{п1}$, для чего необходимо уменьшить размеры $h_{с1}$ и $b_{з1}$, с учетом того, чтобы $B_{с1}$ и $B_{з1}$ не превышали допускаемых значений, либо удлинить сердечники статора и ротора. При этом увеличится магнитный поток Ф и уменьшится количество проводников в пазу.

Таблица 9-15

Степень защиты	$D_{н1}$, мм	Коэффициент k_5 для различных значений $2p$				
		2	4	6	8	10 и 12
IP44	80—240	0,78	1,0	1,0	1,0	—
	280—500	1,0	1,0	1,0	1,0	—
	520—660	1,0	1,0	0,87	0,87	0,84
	740—990	—	1,0	0,89	0,83	0,77
IP23	280—500	1,07	1,0	0,89	0,84	—
	520—660	1,0	1,0	0,86	0,75	0,66
	740—990	—	1,0	0,89	0,83	0,79

Размеры (мм) элементов обмотки определяют в такой последовательности.

Среднее зубцовое деление статора $t_{ср1}=\pi(D_1+h_{п1})/z_1$ (9-40)

Средняя ширина катушки обмотки статора $b_{ср1}=t_{ср1}y_{п1}$ (9-41)

Средняя длина одной лобовой части катушки $l_{л1}=(1{,}16+0{,}14p)b_{ср1}+15$ (9-42)

Средняя длина витка обмотки	$l_{ср1}=2(l_1+l_{л1})$	(9-43)
Длина вылета лобовой части обмотки (мм):		
при $h\leqslant 132$ мм	$l_{в1}=(0{,}19+0{,}1p)b_{ср1}+10$	(9-44)
при $h\geqslant 160$ мм	$l_{в1}=(0{,}12+0{,}15p)b_{ср1}+10$	(9-45)

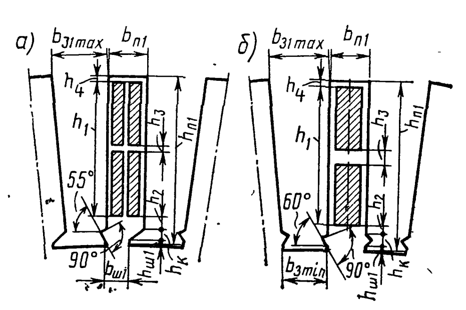


Рис. 9.9. Прямоугольные пазы статора: полуоткрытые (*а*) и открытые (*б*)

Конструкция изоляции обмотки статора из круглых проводников, расположенных в трапецеидальных полузакрытых пазах, приведена в приложениях 27 и 29.

Обмотка статора с прямоугольными полуоткрытыми и открытыми пазами. Достоинством прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов статора (рис. 9-9) является возможность размещения в них проводов прямоугольного поперечного сечения, что повышает коэффициент заполнения пазов медью, а также надежность обмотки.

Для определения предварительной ширины зубца в наиболее узком месте $b_{з1min}'$ следует принять предварительное значение магнитной индукции в этой части зубца $B_{з1max}'$ по табл. 9-16.

Таблица 9-16

Форма пазов	2p	$B'_{з1\,max}$ (Тл) для двигателей со степенью защиты	
		IP44	IP23
Полуоткрытые	2 4 — 12	1,75—1,95 1,6—1,8	1,9—2,1 1,7—1,9
Открытые	2 4 — 12	1,7—1,9 1,6—1,8	1,8—2,0 1,7—1,9

Примечание. Уточненные при дальнейших расчетах значения $B_{з1\,max}$ не должны превышать указанные в таблице более чем на 10%.

Рекомендуется применять следующие марки проводов прямоугольного сечения: для класса B — ПЭТВП (при $U\leqslant 660$ В) и ПЭТВСД (при $U=6000$ В); для класса F — ПЭТП-155; для класса H — ПЭТП-200.

Выбор размеров прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов и расположенных в них проводов производят в такой последовательности.

Предварительное значение магнитной индукции в наиболее узком месте зубца статора (Тл)	$B'_{з1max}$ — по табл. 9-16

Зубцовое деление статора в наиболее узком месте (мм) (для полуоткрытых пазов)	$t_{1min}=\pi(D_1+2h_{ш1}+2h_к)/z_1$	(9-46)
Предварительная ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b'_{з1min}=t_{1min}B_б/(k_cB'_{з1max})$	(9-47)
Предварительная ширина полуоткрытого и открытого паза в штампе (мм)	$b'_{п1}=t_{1min}-b'_{з1min}$	(9-48)
Ширина шлица полуоткрытого паза (мм)	$b_{ш1}\approx 0{,}6b'_{п1}$	(9-49)
Количество эффективных проводников по ширине паза	При полуоткрытых пазах и $N_{п1}$ четном $N_ш=2$. При $N_{п1}$ нечетном $N_ш=1$; при этом количество элементарных проводников $c\geqslant 2$ и четное. При открытых пазах $N_ш=1$; 2	
Допустимая ширина эффективного проводника с витковой изоляцией (мм)	$b'_{эф}=(b'_{п1}-2b_{и1}-b_c)/N_ш$	(9-50)
Количество эффективных проводников по высоте паза	$N_в=N_{п1}/N_ш$	(9-51)
Предварительная высота спинки статора (мм)	h'_{c1} — по (9-24)	
Предварительная высота паза (мм)	$h'_{п1}$ — по (9-25)	
Допустимая высота эффективного проводника с витковой изоляцией (мм)	$h'_{эф}=(h_{п1}-h_{и1}-h_к-h_{ш1}-h_c)/N_в$	(9-52)
Площадь эффективного проводника (мм²)	$S'_{эф}=h'_{эф}b'_{эф}$	(9-53)

Здесь $h_{и1}$, $2b_{и1}$ — общая толщина изоляции по высоте и ширине паза (табл. 9-17); h_c, b_c — припуски на сборку сердечника по высоте и ширине составляют для $h\leqslant 355$ мм; h_c и $b_c=0{,}3$, а для $h\geqslant 400$ мм: h_c и $b_c=0{,}35$; высота шлица $h_{ш1}=1{,}0$ мм, высота клина $h_к=3{,}0\div 3{,}5$ мм.

Таблица 9-17

h, мм	Форма паза	$h_{и1}$, мм	$2b_{и1}$, мм
280—355	Полуоткрытые	4,5	2,2
280—355	Открытые	4,5	1,8
400—450	»	12,4	4,1

Примечание. Значения $h_{и1}$ и $2b_{и1}$ учитывают технологические зазоры на укладку обмотки и толщину всех изоляционных прокладок, но не учитывают толщину витковой изоляции и высоту клина; $b_{и1}$ — односторонняя толщина корпусной изоляции, $2b_{и1}$ — двусторонняя.

Для определения количества элементарных проводов в одном эффективном можно исходить из наибольшей допустимой по технологическим соображениям площади и ширины элементарного

проводника. Для полуоткрытых пазов: площадь элементарного провода $S_{доп} \leqslant 10$ мм^2, ширина $b_{доп} \leqslant 4{,}7$ мм; для открытых пазов $S_{доп} \leqslant 18$ мм^2, $b_{доп} \leqslant 7{,}4$ мм.

Для уменьшения добавочных потерь от вихревых токов, наводимых потоком рассеяния, прямоугольные проводники располагают в пазу статора* плашмя, т. е. большей стороной по ширине паза. При этом высота эффективного проводника $a^*_{эф}$ ограничена (для низковольтных машин $a_{эф} \leqslant 2{,}12$ мм, для высоковольтных $a_{эф} \leqslant 2{,}5$). Если высота (меньшая сторона эффективного проводника) получается больше указанной, то эффективный проводник по высоте также подразделяют на элементарные. Предварительно количество элементарных проводников определяют делением $S_{эф}$ на $S_{доп}$ с округлением до ближайшего большего целого числа c'.

Количество элементарных проводников в одном эффективном по ширине определяют делением полученной ширины эффективного проводника $b'_{эф}$ на $b_{доп}$ с округлением до ближайшего большого целого числа c_b. Разделив c' на c_b, получим предварительно количество элементарных проводников в одном эффективном по высоте паза c'_a. Разделив $a'_{эф}$ на c'_a, определяют размер элементарного проводника по высоте паза. Если он превысит 2,12 мм (для низковольтных машин) или 2,5 (для высоковольтных), то количество элементарных проводников по высоте паза следует увеличить. Получают окончательное количество элементарных проводников по высоте паза c_a и общее их количество $c = c_a c_b$.

Меньший a' и больший b' размеры неизолированного элементарного провода

$$a' = (a'_{эф}/c_a) - \Delta_и; \qquad (9\text{-}54)$$

$$b' = (b'_{эф}/c_b) - \Delta_и, \qquad (9\text{-}55)$$

где $\Delta_и$ — двусторонняя толщина изоляции провода, мм (см. приложение 3).

По приложению 2 находят ближайший стандартизованный элементарный неизолированный провод с размерами a и b, близкими к вычисленным по (9-54) и (9-55), и площадь его поперечного сечения S.

Размер по высоте паза в штампе (мм)

$$h_{п1} = N_в c_a (a + \Delta_и) + h_{и1} + h_с. \qquad (9\text{-}56)$$

Размер по ширине паза в штампе (мм)

$$b_{п1} = N_ш c_b (b + \Delta_и) + 2b_{и1} + b_с. \qquad (9\text{-}57)$$

---

* Здесь и далее для прямоугольных проводников принимаются в соответствии с ГОСТ 434—78 на обмоточные провода обозначения меньшего размера «a» и большего «b».

Уточненная ширина зубца в наиболее узкой части (мм)

$$b_{з1\,min}=t_{1\,min}-b_{п1}. \qquad (9\text{-}58)$$

Уточненная магнитная индукция в наиболее узкой части зубца статора (Тл)

$$B_{з1\,max}=t_1 B_\delta/(b_{з1\,min} k_c). \qquad (9\text{-}59)$$

Плотность тока в обмотке статора J_1 определяют по (9-39), а h_{c1} — по (9-24). Далее находят удельную тепловую нагрузку от потерь в обмотке A_1J_1 и сравнивают ее со средним допускаемым значением из рис. 9-8. При классах нагревостойкости В и Н, а также при частотах вращения, отличающихся от 1500 об/мин, принимаемое из рис. 9-8 значение $(A_1J_1)_{доп}$ должно быть умножено на поправочные коэффициенты, как это было рекомендовано для трапецеидальных пазов. Если полученный при расчете двигателя показатель A_1J_1 превышает допускаемое значение более чем на 15%, то следует поступить так, как было рекомендовано для трапецеидальных пазов. Размеры обмотки определяют в такой последовательности.

Среднее зубцовое деление статора (мм)	$t_{ср1}$ — по (9-40)	
Средняя ширина катушки обмотки (мм)	$b_{ср1}$ — по (9-41)	
Средняя длина одной лобовой части обмотки (мм)		
при $U\leqslant 660$ В	$l_{л1}=1{,}3b_{ср1}+h_{п1}+50$	(9-60)
при $U=6000$ В	$l_{л1}=1{,}2b_{ср1}+h_{п1}+90$	(9-61)
Средняя длина витка обмотки (мм)	$l_{ср1}$ — по (9-43)	
Длина вылета лобовой части обмотки (мм) при $U\leqslant 660$ В	$l_{в1}=0{,}4b_{ср1}+h_{п1}/2+25$	(9-62)
То же, при $U=6000$ В	$l_{в1}=0{,}35b_{ср1}+h_{п1}/2+45$	(9-63)

Конструкция изоляции обмотки статора из прямоугольного провода, расположенного в полуоткрытых или в открытых пазах, приведена в приложениях 28 и 30.

Примеры расчета машин

3. Обмотка статора. Параметры, общие для любой обмотки.

Для двигателя № 1 принимаем однослойную всыпную концентрическую обмотку (табл. 9-4) из провода марки ПЭТВ (класс нагревостойкости В), укладываемую в трапецеидальные полузакрытые пазы (рис. 9-7). Для двигателя № 2 принимаем двухслойную обмотку из жестких катушек (табл. 9-4), выполняемую проводом ПЭТП-155 (класс нагревостойкости F), укладываемую в прямоугольные полуоткрытые пазы (рис. 9-9).

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
37	k_{p1}	(9-9)	$0{,}5/[3\sin(60/(3\cdot 2))] = 0{,}96$	$0{,}5/[4\sin(60/(4\cdot 2))] = 0{,}959$
38	β_1, о. е.	§ 9-4	1,0	0,75
39	$y_{п1}$, р. паз	(9-10)	$36/4 = 9$	—
	$y_{п1}$, р. паз	(9-11)	—	$0{,}75\cdot 72/6 = 9$
40	k_{y1}	(9-12)	1,0	$(0{,}75\cdot 90°) = 0{,}924$
41	$k_{об1}$	(9-13)	$0{,}96\cdot 1 = 0{,}96$	$0{,}959\cdot 0{,}924 = 0{,}886$
42	Φ', Вб	(9-14)	$0{,}885\cdot 153\cdot 115\cdot 10^{-6}/2 = 0{,}0078$	$0{,}875\cdot 422\cdot 225\cdot 10^{-6}/3 = 0{,}0277$
43	w'_1	(9-15)	$\dfrac{0{,}97\cdot 220}{222\cdot 0{,}96(50/50)} \times \dfrac{1}{0{,}0078} = 128$	$\dfrac{0{,}98\cdot 380}{222\cdot 0{,}886\cdot 0{,}0277} = 68$
44	a_1	§ 9-4	1	3
45	$N'_{п1}$	(9-16)	$128\cdot 1/(2\cdot 3) = 21{,}3$	$68\cdot 3/(3\cdot 4) = 17$
46	$N_{п1}$	§ 9-4	21	$17 = 8 + 9$
47	w_1	(9-17)	$21\cdot 2\cdot 3/1 = 126$	$17\cdot 3\cdot 4/3 = 68$
48	Φ, Вб	(9-18)	$0{,}0078\cdot 128/126 = 0{,}0079$	$0{,}0277\cdot 68/68 = 0{,}0277$
49	B_δ, Тл	(9-19)	$0{,}885\cdot 128/126 = 0{,}9$	$0{,}875\cdot 68/68 = 0{,}875$
50	I_1, А	(9-20)	$7{,}5\cdot 10^3/(3\cdot 220\cdot 0{,}87 \times 0{,}86) = 15{,}2$	$160\cdot 10^3/(3\cdot 380\cdot 0{,}93 \times 0{,}88) = 171{,}5$
51	A_1, А/см	(9-21)	$\dfrac{10\cdot 21\cdot 36\cdot 15{,}2}{\pi\cdot 153\cdot 1} = 239$	$\dfrac{10\cdot 17\cdot 72\cdot 171{,}5}{\pi\cdot 422\cdot 3} = 528$
52	B_{c1}, Тл	табл. 9-13	1,65	1,55
53	t_1, мм	(9-22)	$\pi\cdot 153/36 = 13{,}3$	$\pi\cdot 422/72 = 18{,}4$
	Обмотка статора с трапецеидальными полузакрытыми пазами			
54	$B_{з1}$, Тл	табл. 9-14	1,85	—
55	$b_{з1}$, мм	(9-23)	$13{,}3\cdot 0{,}9/(0{,}97\cdot 1{,}85) = 6{,}67$	—
56	h_{c1}, мм	(9-24)	$7{,}9\cdot 10^3/(2\cdot 0{,}97\cdot 115 \times 1{,}65) = 21{,}5$	—
57	$h_{п1}$, мм	(9-25)	$[(233-153)/2] - 21{,}5 = 18{,}5$	—
58	b_1, мм	(9-26)	$[\pi(153 + 2\cdot 18{,}5)/36] - 6{,}67 = 9{,}9$	—
59	$b'_{ш1}$ мм	(9-34)	$0{,}3\sqrt{132} = 3{,}5$	—
60	b_2, мм	(9-27)	$[\pi(153 + 2\cdot 0{,}5 - 3{,}5) - 36\cdot 6{,}67]/(36 - \pi) = 7{,}07$	—
61	Проверка b_1 и b_2, мм	(9-28)	$36(9{,}9 - 7{,}07) + \pi(7{,}07 - 3{,}5) - 2\pi(18{,}5 - 0{,}5) = 0$	—
62	$S_{п1}$, мм²	(9-29)	$\dfrac{9{,}9 + 7{,}07}{2}\left(18{,}5 - 0{,}5 - \dfrac{7{,}07 - 3{,}5}{2}\right) = 137{,}6$	—

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
63	$S'_{п1}$, мм²	(9-30)	$\frac{9,9+7,07}{2}-0,1)\times(18,5-0,5-\frac{7,07-3,5}{2}-0,1)=136,8$	
64	$S_и$, мм²	(9-31)	$0,25(2\cdot 18,5+9,9+7,07)=13,5$	—
65	$S_{пр}$, мм²	(9-32)	$0,5\cdot 9,9+0,75\cdot 7,07=10,25$	—
66	$S''_{п1}$, мм²	(9-33)	$136,8-13,5-10,25=113,1$	—
67	$c(d')^2$, мм²	(9-36) § 9-4	$113,1\cdot 0,75/21=4,04$ $k'_п=0,75$	—
68	c	§ 9-4	2	—
69	d', мм	(9-37)	$\sqrt{0,75\cdot 113,1/(21\cdot 2)}=1,41$	
70	d/d', мм	приложение 1	1,32/1,405	—
71	S, мм²	приложение 1	1,368	—
72	$k_п$	(9-35)	$21\cdot 2\cdot 1,405^2/113,1=0,73$	—
73	$b''_{ш1}$, мм	(9-38)	$1,405+2\cdot 0,25+0,4=2,305$; принимаем $b_{ш1}=b'_{ш1}=3,5$	—
74	J_1, А/мм²	(9-39)	$15,2/(2\cdot 1,368\cdot 1)=5,56$	—
75	A_1J_1, А²/(см·мм²)	§ 9,4	$239\cdot 5,56=1329$	—
76	$(A_1J_1)_{доп}$, А²/(см·мм²)	рис. 9-8	$2100\cdot 0,75=1575$	—
77	$t_{ср1}$, мм	(9-40)	$\pi(153+18,5)/36=15$	—
78	$b_{ср1}$, мм	(9-41)	$15\cdot 9=135$	—
79	$l_{л1}$, мм	(9-42)	$(1,16+0,14\cdot 2)135+15=209$	—
80	$l_{ср1}$ мм	(9-43)	$2(115+209)=648$	—
81	$l_{в1}$, мм	(9-44)	$(0,19+0,1\cdot 2)\cdot 135+10=62,65$	—
	Обмотка статора с прямоугольными полуоткрытыми пазами			
82	$B'_{з1\,max}$, Тл	табл. 9-16	—	1,8
83	$h_{ш1}$, мм	§ 9-4	—	1,0
84	$h_к$, мм	§ 9-4	—	3,0
85	t_{1min}, мм	(9-46)	—	$\pi(422+2\cdot 1+2\cdot 3)/72=18,8$
86	$b'_{з1\,min}$, мм	(9-47)	—	$18,8\cdot 0,875/(0,95\cdot 1,8)=9,6$
87	$b'_{п1}$, мм	(9-48)	—	$18,8-9,6=9,2$
88	$b_{ш1}$, мм	(9-49)	—	$0,6\cdot 9,2=5,5$
89	$N_ш$	§ 9-4	—	1

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
90	$2b_и$, мм	табл. 9-17	—	2,2
91	$b'_{эф}$, мм	(9-50)	—	(9,2—2,2—0,3)/1=6,7
92	$N_в$	(9-51)	—	17,1 = 17
93	$h'_{с1}$, мм	(9-24)	—	$2,77 \cdot 10^4/(2 \cdot 0,95 \cdot 225 \times$ $\times 1,55) = 41,8$
94	$h'_{п1}$, мм	(9-25)	—	(590 — 422)/2 — — 41,8 = 42,2
95	$a'_{эф}$, мм	(9-52), табл. 9-17	—	(42,2 — 4,5 — 3 — — 1 — 0,3)/17 = 1,96
96	$S'_{эф}$, мм²	(9-53)	—	$1,96 \cdot 6,7 = 13,14$
97	c	§ 9-4	—	2
98	c_b	§ 9-4	—	2
99	c_a	§ 9-4	—	1
100	a', мм	(9-54), приложение 3	—	1,96/1 — 0,15 = 1,81
101	b', мм	(9-55)	—	6,7/2 — 0,15 = 3,2
102	$a \times b$, мм	приложение 2	—	$1,8 \times 3,35$
103	S, мм²	то же	—	5,667
104	$h_{п1}$, мм	(9-56)	—	$17 \cdot 1(1,8 + 0,15) +$ $+ 4,5 + 0,3 = 38$
105	$b_{п1}$, мм	(9-57)	—	$1 \cdot 2(3,35 + 0,15) +$ $+ 2,2 + 0,3 = 9,5$
106	$h_{с1}$, мм	из (9-25)	—	(590 — 422)/2 — 38 = 46
107	$b_{з1\,min}$, мм	(9-58)	—	18,8 — 9,5 = 9,3
108	$B_{з1\,max}$, Тл	(9-59)	—	$18,8 \cdot 0,875/(9,3 \times$ $\times 0,95) = 1,8$
109	J_1 А/мм²	(9-39)	—	$171,5/(2 \cdot 5,667 \cdot 3) =$ $= 5,04$
110	$A_1 J_1$, А²/(см·мм²)	§ 9-4	—	$528 \cdot 5,04 = 2661$
111	$(A_1 J_1)_{доп}$, А²/(см·мм²)	рис. 9-8, табл. 9-15	—	$3350 \cdot 0,86 = 2880$
112	$t_{ср1}$, мм	(9-40)	—	$\pi(422 + 38)/72 = 0$
113	$b_{ср1}$, мм	(9-41)	—	$20 \cdot 9 = 180$
114	$l_{л1}$, мм	(9-60)	—	$1,3 \cdot 180 + 38 + 50 = 322$
115	$l_{ср1}$, мм	(9-43)	—	2(225 + 322) = 1094
116	$l_{в1}$, мм	(9-62)	—	$0,4 \cdot 180 + 38/2 +$ $+ 25 = 116$

§ 9-5. Обмотка короткозамкнутого ротора

Обмотка ротора с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами. Пазы ротора имеют обычно овальную форму (рис. 9.10*а*, *б*), причем радиусы r_1 и r_2 принимают такими, чтобы стенки зубцов были параллельны ($b_{з2}$=const) на протяжении расстояния h_1. Такие пазы применяют в двигателях с $h \leqslant 250$ мм. В двигателях с $h \leqslant 132$ мм пазы обычно выполняют полузакрытыми, а с $h \leqslant$ $\geqslant 160$ мм — закрытыми.

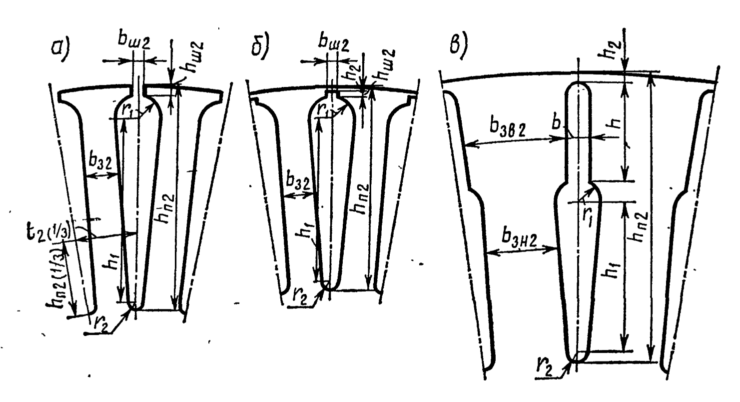


Рис. 9-10. Пазы короткозамкнутого ротора:
а — овальные полузакрытые; *б* — овальные закрытые; *в* — бутылочной формы

Примерные значения высот пазов короткозамкнутого ротора $h_{п2}$ приведены на рис. 9-12. Чем больше принимаемое значение $h_{п2}$, тем меньше высота спинки ротора $h_{с2}$ и соответственно больше магнитная индукция в спинке $B_{с2}$. Если при проверке расчетом значение $B_{с2}$ превысит предел, равный 1,6 Тл, то высоту паза $h_{п2}$, принятую из рисунка, снижают. Расчет размеров зубцовой зоны (зубцов и пазов) ротора начинают с определения ширины зубца $b_{з2}$, исходя из средних значений магнитной индукции в зубцах ротора $B_{з2}$ (табл. 9-18).

Таблица 9-18

h, мм	2*p*	$B_{з2}$ (Тл) для двигателей со степенью защиты	
		IP44	IP23
50—132	2; 4; 6; 8	1,60—1,80	1,85—2,05
160—250	2 4; 6; 8	1,75—1,95 1,70—1,90	1,85—2,05 1,75—1,95
280—355	2 4 6; 8; 10; 12	1,60—1,80 1,80—2,00 1,70—1,90	1,80—2,00 2,00—2,20 1,80—2,00

Определяют радиусы пазов r_1 и r_2, обеспечивающие постоянство $b_{з2}$. Если окажется, что $r_2<1$ (для $h\leqslant132$ мм) или $r_2<2$ (для $h\geqslant160$ мм), то следует уменьшить $b_{з2}$, повысив $B_{з2}$.

Определение размеров овальных полузакрытых и закрытых пазов производят в такой последовательности:

Высота паза (мм)	$h_{п2}$ — из рис. 9-12	
Расчетная высота спинки ротора (мм):		
для $h\leqslant63$ мм, $2p=2$	$h_{c2}=0,49D_{н2}-h_{п2}$	(9-64)
для $h\leqslant63$ мм, $2p\geqslant4$	$h_{c2}=0,4D_{н2}-h_{п2}$	(9-65)
для $h\geqslant71$ мм, $2p=2$	$h_{c2}=0,58D_{н2}-h_{п2}-\frac{2}{3}d_{к2}$,	(9-66)
для $h\geqslant71$ мм, $2p\geqslant4$	$h_{c2}=0,38D_{н2}-h_{п2}-\frac{2}{3}d_{к2}$	(9-67)
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	$B_{з2}=\Phi\cdot10^6/(2k_c l_2 h_{c2})$	(9-68)
Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	$t_2=\pi D_{н2}/z_2$	(9-69)
Магнитная индукция в зубцах ротора (Тл)	$B_{з2}$ — по табл. 9-18	
Ширина зубца (мм)	$b_{з2}=t_2B_\delta/(B_{з2}k_c)$	(9-70)
Меньший радиус паза (мм)	$r_2=\dfrac{\pi(D_{н2}-2h_{п2})-z_2b_{з2}}{2(z_2-\pi)}$	(9-71)
Больший радиус паза (мм)	$r_1=\dfrac{\pi(D_{н2}-h_{ш2}-2h_2)-z_2b_{з2}}{2(z_2+\pi)}$	(9-72)
Расстояние между центрами радиусов (мм)	$h_1=h_{п2}-h_{ш2}-h_2-r_1-r_2$	(9-73)
Проверка правильности определения r_1 и r_2 исходя из условия $b_{з2}=\mathrm{const}$	$\pi h_1-z_2(r_1-r_2)\approx0$	(9-74)
Площадь поперечного сечения стержня, равная площади поперечного сечения паза в штампе (мм²)	$S_{ст}=s_{п2}=0,5\pi(r_1^2+r_2^2)+(r_1+r_2)h_1$	(9-75)

Здесь для полузакрытого паза $h_{ш2}=0,5\div0,75$ мм; $h_2=0$; $b_{ш2}=1,0\div1,5$ мм; для закрытого паза $h_{ш2}=0,7$ мм, $h_2=0,3$ мм; $b_{ш2}=1,5$ мм. При отсутствии аксиальных каналов в роторе $d_{к2}=0$.

Пазы ротора бутылочной формы. Пазы короткозамкнутого ротора двигателей с $h=280\div355$ мм обычно имеют бутылочную форму и выполняются полузакрытыми (рис. 9-10*в*). Размеры нижней части бутылочного паза выбирают так, чтобы обеспечить равновеликое поперечное сечение зубцов $b_{з.н2}$ на протяжении h_1.

Ход расчета аналогичен описанному для ротора с овальными пазами. По рис. 9-12 выбирают примерное значение высоты паза ротора $h_{п2}$. Этим определяется расчетная высота спинки ротора h_{c2} и магнитная индукция в спинке ротора B_{c2}, которая не должна превышать 1,6 Тл. Затем находят ширину зубца в его нижней части $b_{з.н2}$, исходя из того, чтобы магнитная индукция в нижней части зубцов ротора $B_{з.н2}$ не превосходила бы значений, приведенных в табл. 9-18.

Для верхней части паза принимают $h_2=0{,}2\div0{,}5$ мм; $h=15$ мм; затем рассчитывают размеры нижней части паза: больший r_1 и меньший r_2 радиусы; расстояние между их центрами, а также ширину верхней части стержня b. Значение r_2 должно быть не менее 2 мм, иначе следует уменьшить $b_{з.н2}$, повысив $B_{з.н2}$.

Определение размеров пазов ротора бутылочной формы производят в такой последовательности:

Высота паза (мм)	$h_{п2}$ — из рис. 9-12
Расчетная высота спинки ротора (мм)	h_{c2} — по (9-66)—(9-67)
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	B_{c2} — по (9-68)
Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	t_2 — по (9-69)
Ширина зубца в нижней части зубца (мм)	$b_{з.н2}$ — по (9-70)
Меньший радиус паза (мм)	$r_2=[\pi(D_{н2}-2h_{п2})-z_2b_{з.н2}]/[2(z_2-\pi)]$ (9-76)
Больший радиус паза (мм)	$r_1=[\pi(D_{н2}-2h_2-2h)-z_2b_{з.н2}]/[2(z_2+\pi)]$ (9-77)
Расстояние между центрами радиусов (мм)	$h_1=h_{п2}-h_2-h-r_1-r_2$ (9-78)
Правильность определения r_1 и r_2 исходя из требования $b_{з.н2}=\mathrm{const}$	по (9-74)
Ширина верхней части стержня (мм)	$b\approx(1\div1{,}25)r_1$ (9-79)
Площадь поперечного сечения нижней части стержня (мм²)	$S_{ст.н}=\dfrac{\pi}{2}(r_1^2+r_2^2)+(r_1+r_2)h_1$ (9-80)
Площадь поперечного сечения верхней части стержня (мм²)	$S_{ст.в}=b(h-0{,}11b)$ (9-81)
Общая площадь поперечного сечения стержня, равная площади поперечного сечения паза в штампе (мм²)	$S_{ст}=S_{п2}=S_{ст.н}+S_{ст.в}$ (9-82)

Открытые пазы ротора прямоугольной формы. Открытые прямоугольные пазы в роторе (рис. 9-11) применяются для высоко-

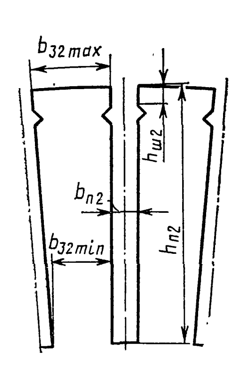


Рис. 9-11. Пазы короткозамкнутого ротора прямоугольной формы

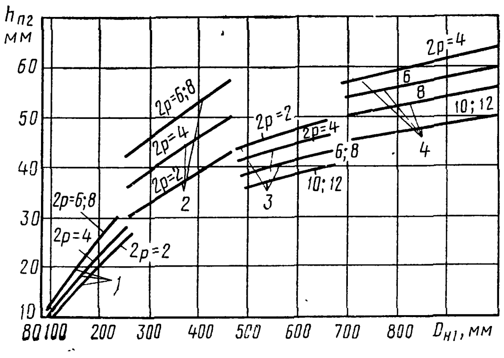


Рис. 9-12. Средние значения $h_{п2}=f(D_{н1})$ короткозамкнутого ротора:

1 — ротор с овальными полузакрытыми пазами; 2 — ротор с овальными закрытыми пазами; 3 — ротор с бутылочными пазами; 4 — ротор с прямоугольными открытыми пазами

вольтных двигателей с $h=400\div450$ мм. В эти пазы укладывают прямоугольные алюминиевые шины, привариваемые к алюминиевым короткозамыкающим кольцам.

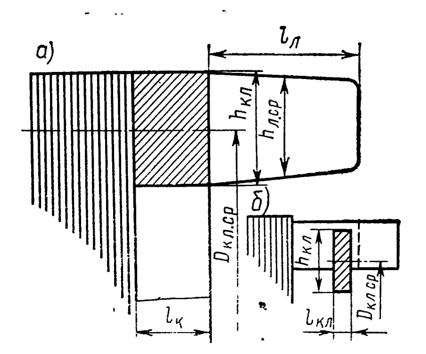


Рис. 9-13. Короткозамыкающие кольца ротора

Ход расчета аналогичен описанному для ротора с овальными пазами. По рис. 9-12 выбирают предварительно значение высоты паза ротора $h'_{п2}$, что предопределяет предварительное значение высоты спинки ротора $h'_{с2}$ и магнитную индукцию в спинке ротора, которая не должна превышать 1,6 Тл. Затем находят ширину зубца в наиболее узком месте, исходя из того, чтобы магнитная индукция в этой части зубцов была: для исполнения IP44—$B'_{з2\,max}=1,5\div1,7$ Тл; для IP23—$B'_{з2\,max}=1,6\div1,8$ Тл. Затем выбирают ближайшие стандартные размеры прямоугольного алюминиевого стержня (см. приложение 4) и по ним уточняют размеры паза, зубца, спинки (округленные до десятых долей мм в большую сторону) и магнитную индукцию.

Размеры открытых пазов ротора прямоугольной формы определяют в такой последовательности.

Предварительные размеры		
Высота паза (мм)	$h'_{п2}$ — из рис. 9-12	
Высота спинки ротора (мм)	$h'_{с2}$ — по (9-66) или по (9-67)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	$B'_{с2}$ — по (9-68)	
Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	t_2 — по (9-69)	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b'_{з2min}=t_2B_\delta/(B'_{з2max}k_c)$	(9-83)
Ширина паза (мм)	$b'_{п2}=[\pi(D_{н2}-2h'_{п2})/z_2]-b'_{з2min}$	(9-84)
Размеры стержня по высоте (мм)	$h'_{ст}=h'_{п2}-h_c-h_{ш2}$	(9-85)
То же, по ширине	$b'_{ст}=b'_{п2}-b_c$	(9-86)
Уточненные размеры		
Ближайшие стандартные размеры стержня (мм) и его сечение (мм²)	$h_{ст}$, $b_{ст}$ и $S_{ст}$ — по приложению 4	
Высота паза (мм)	$h_{п2}=h_{ст}+h_c+h_{ш2}$	(9-87)
Ширина паза (мм)	$b_{п2}=b_{ст}+b_c$	(9-88)
Площадь поперечного сечения паза (мм²)	$S_{п2}=h_{п2}b_{п2}$	(9-89)
Высота спинки ротора (мм)	$h_{с2}$ — по (9-66) или по (9-67)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	$B_{с2}$ — по (9-68)	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b_{з2min}=[\pi(D_{н2}-2h_{п2})/z_2]-b_{п2}$	(9-90)
Магнитная индукция в наиболее узком месте зубца (Тл)	$B_{з2max}=t_2B_\delta/(b_{з2min}k_c)$	(9-91)
Длина стержня (мм)	$l_{ст}=l_2+2l_{л2}$	(9-92)

Здесь h_c и b_c — припуски на сборку сердечника (см. § 9-4); $h_c=4$ мм.

Короткозамыкающее кольцо обмотки ротора. На рис. 9-13 показаны короткозамыкающие кольца для литой (*а*) и сварной (*б*)

конструкций клетки. Размеры кольца определяют следующим образом. Поперечное сечение кольца $S_{кл}$ связано с ранее определенным сечением стержня клетки $S_{ст}$, а высота кольца $h_{кл}$ — с высотой паза $h_{п2}$. Это предопределяет длину кольца $l_{кл}$. Для определения расположения кольца клетки вычисляют его средний диаметр $D_{кл.ср}$.

Размеры короткозамыкающего кольца находят в такой последовательности:

Поперечное сечение кольца (мм²):		
литой клетки	$S_{кл}=(0{,}35\div0{,}45)z_2S_{ст}/(2p)$	(9-93)
сварной клетки	$S_{кл}=0{,}4z_2S_{ст}/(2p)$	(9-94)
Высота кольца (мм):		
литой клетки	$h_{кл}\approx(1{,}1\div1{,}2)h_{п2}$	(9-95)
сварной клетки	$h_{кл}\approx1{,}2h_{п2}$	(9-96)
Длина кольца (мм)	$l_{кл}=S_{кл}/h_{кл}$	(9-97)
Средний диаметр кольца (мм):		
литой клетки	$D_{кл.ср}=D_{н2}-h_{кл}$	(9-98)
сварной клетки	$D_{кл.ср}=D_{н2}-2h_{ш2}-2h_{кл}-0{,}5h_{ст}$	(9-99)
Вылет лобовой части обмотки (мм)	$l_{в2}=k_лl_{л2}+l_{кл}$	(9-100)

Здесь $l_{л2}=50$ мм — длина лобовой части стержня; $k_л=0{,}9$—коэффициент, учитывающий изгиб стержня.

Примеры расчета машин.
4. Обмотка короткозамкнутого ротора

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1
	Размеры овальных полузакрытых пазов		
117	$h_{п2}$, мм	рис. 9-12	$25{,}5$
118	h_{c2}, мм	(9-67)	$0{,}38\cdot152{,}3-25{,}5-(2/3)0=32{,}4$
119	B_{c2}, Тл	(9-68)	$0{,}0079\cdot10^6/(2\cdot0{,}97\cdot115\cdot32{,}4)=1{,}09$
120	t_2, мм	(9-69)	$\pi\cdot152{,}3/34=14$
121	$B_{з2}$, Тл	табл. 9-18	$1{,}7$
122	$b_{з2}$, мм	(9-70)	$14\cdot0{,}9/(1{,}7\cdot0{,}97)=7{,}6$
123	r_2, мм	(9-71)	$\frac{\pi(152{,}3-2\cdot25{,}5)-34\cdot7{,}6}{2(34-\pi)}\approx1{,}0$
124	r_1, мм	(9-72)	$\frac{\pi(152{,}3-2\cdot0{,}75-2\cdot0{,}3)-34\cdot7{,}6}{2(34+\pi)}=2{,}9$
125	h_1, мм	(9-73)	$25{,}5-0{,}75-0-1-2{,}9=20{,}8$
126	проверка r_1 и r_2	(9-74)	$\pi\cdot20{,}8-34(2{,}9-1)\approx0$
127	$S_{ст}=S_{п2}$, мм²	(9-75)	$(\pi/2)(2{,}9^2+1^2)+(2{,}9+1)20{,}8=95{,}9$
	Размеры короткозамыкающего кольца		
128	$S_{кл}$, мм²	(9-93)	$0{,}4\cdot34\cdot95{,}9/4=326$
129	$h_{кл}$, мм	(9-95)	$1{,}2\cdot25{,}5=30{,}6$
130	$l_{кл}$, мм	(9-97)	$326/30{,}6=10{,}65$
131	$D_{кл.ср}$, мм	(9-98)	$152{,}3-30{,}6=121{,}7$

§ 9-6. Обмотка фазного ротора

Тип обмотки и общие положения. Обычно в роторах применяют двухслойную волновую обмотку из медных изолированных стержней прямоугольного поперечного сечения. В пазу располагают по два стержня (один над другим, большей стороной по высоте паза). Следовательно, количество проводников в пазу $N_{п2}=2$. Если по расчету сечение эффективного стержня получается больше 100 мм^2, то его разделяют на два элементарных; тогда по

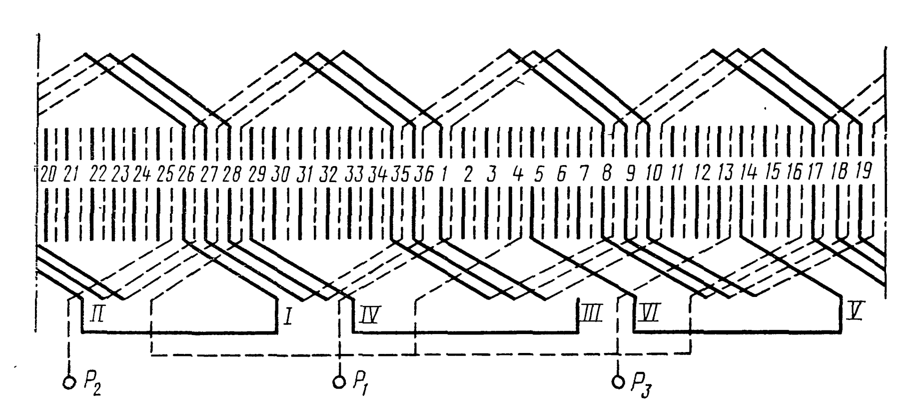


Рис. 9-14. Схема двухслойной волновой обмотки фазного ротора (одной фазы) $Z_2=36$; $2p=4$; $q_2=3$; $a=1$

ширине паза располагают два стержня, изолированных вместе. Основные свойства двухслойных волновых обмоток ротора и методы выполнения их подробно освещены в [8; 22]. На рис. 9-14 приведена для примера развернутая схема двухслойной волновой обмотки фазного ротора. Количество пазов ротора z_2 должно выбираться с учетом рекомендаций, приведенных в § 9-3, и, в частности, табл. 9-12. Количество пазов на полюс и фазу ротора q_2 определяется по (9-8). Обмотка имеет одну параллельную ветвь $a_2=1$. Количество последовательно соединенных витков обмотки одной фазы

$$w_2=2pq_2. \tag{9-101}$$

Шаги обмотки для целого и дробного q_2 находят следующим образом. При целом q_2 шаги секций с передней (со стороны выводов) и с задней стороны $y_{п2}$ и $y'_{п2}$ принимаются равными $3q_2$, а шаг в конце обхода ротора укороченный: $y''_{п2}=3q_2-1$. При дробном q_2 шаг обмотки с передней стороны $y_{п2}=3q_2-1/2$, с задней $y'_{п2}=3q_2+1/2$, а шаг в конце обхода $y''_{п2}=3q_2-1/2$. Обмотка с дробным q_2 считается обмоткой с укороченным шагом; при этом $\beta_2\approx 0{,}96$. Коэффициенты распределения $k_{р2}$, укорочения $k_{у2}$ и обмоточный коэффициент $k_{об2}$ определяются так же, как для обмотки статора по (9-9), (9-12), (9-13) с заменой q_1 на q_2, z_1 на z_2, β_1 на β_2.

Таблица 9-19

$2p$	$B'_{з2\,max}$ (Тл) для двигателей со степенью защиты	
	IP44	IP23
4	1,8—2,2	1,9—2,35
6—12	1,7—2,1	1,7—2,1

Примечание. См. примечание к табл. 9-16.

Таблица 9-20

$2p$	$h'_{п2}$, мм	$2p$	$h'_{п2}$, мм
4	$33{,}5+0{,}024D_{н1}$	8	$29+0{,}024D_{н1}$
6	$31{,}4+0{,}024D_{н1}$	10 и 12	$25{,}8+0{,}024D_{н1}$

Коэффициент трансформации ЭДС и тока

$$k_{тр}=w_1k_{об1}/(w_2k_{об2}). \qquad (9\text{-}102)$$

Электродвижущая сила обмотки (В)

$$E_2=k_{н}U_1/k_{тр}. \qquad (9\text{-}103)$$

При соединении обмотки ротора в звезду напряжение на кольцах (В)

$$U_к\approx\sqrt{3}\,E_2. \qquad (9\text{-}104)$$

Для уменьшения тока, проходящего через кольца, и соответственно потерь в щеточном контакте рекомендуется выбирать отношение напряжения к току кольца $U_к/I_к=0{,}6\div2{,}5$ (бо́льшие значения для больших двигателей), но $U_к$ должно быть не больше 1200 В.

На контактных кольцах асинхронного двигателя с фазным ротором устанавливаются металлографитные щетки марки МГ4.

Обмотка фазного ротора с прямоугольными полузакрытыми пазами. Прямоугольные полузакрытые пазы фазного ротора имеют форму, показанную на рис. 9-15. Они применяются в электродвигателях с $h\geqslant225$ мм. Для нахождения ширины зубца в наиболее узком месте $b_{з2\,min}$ следует принять значение индукции в этой части зубца $B'_{з2\,max}$ по табл. 9-19 и определить предварительное значение $b'_{з2\,min}$ по (9-83). Предварительное значение высоты паза ротора $h'_{п2}$ берут по табл. 9-20.

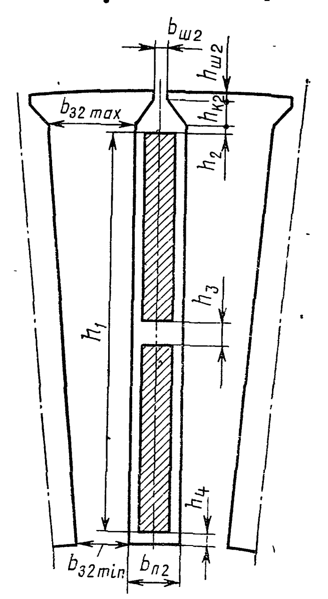


Рис. 9-15. Пазы фазного ротора прямоугольные полузакрытые

Этим определяется предварительное значение высоты спинки ротора $h'_{с2}$ и магнитная индукция в спинке ротора $B_{с2}$, которая не должна превышать 1,6 Тл. Затем находят предварительную ширину паза и допустимые высоту и ширину стержня обмотки ротора. Определяют ближайшие стандартные размеры стержня и его сечение. Потом устанавливают

окончательные размеры зубцовой зоны, высоту спинки ротора, индукции и размеры катушки обмотки.

Ниже приведены (для классов нагревостойкости B, F и H) значения общей толщины изоляции в пазу ротора по высоте и ширине $h_{и2}$ и $2b_{и2}$, включающие толщину изоляции стержня, размеры прокладок и припусков на укладку:

Высота оси вращения h, мм . . .	225—250	280—355	400—450
Высота $h_{и2}$, мм	4,3	4,5	7,1
Ширина $2b_{и2}$, мм	1,4	1,6	3,0

Значение $h_{и2}$ не учитывает высоту клина $h_{к2}$. Размеры следует принимать такими: для клина $h_{к2}=2$ мм (при $h \leqslant 250$ мм), $h_{к2}=2{,}5$ мм (при $h=280 \div 355$ мм), $h_{к2}=3{,}5$ мм (при $h>355$ мм); для шлица $h_{ш2}=1{,}0$ мм, $b_{ш2}=1{,}5$ мм. Конструкция изоляции обмоток фазного ротора представлена в приложении 22. Размеры прямоугольных полузакрытых пазов ротора и расположенных в них проводов рассчитывают в такой последовательности:

Предварительные значения		
Высота паза (мм)	$h'_{п2}$ — по табл. 9-20	
Высота спинки ротора (мм)	h'_{c2} — по (9-67)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	B'_{c2} — по (9-68)	
Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	t_2 — по (9-69)	
Магнитная индукция в наиболее узком месте зубца, ротора (Тл)	$B'_{з2max}$ — по табл. 9-19	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b'_{з2min}$ — по (9-83)	
Ширина паза, (мм)	$b'_{п2}$ — по (9-84)	
Размеры стержня по высоте, мм	$h'=(h'_{п2}-h_{и2}-h_{к2}-h_{ш2}-h_c)/2$	(9-105)
То же, по ширине (мм)	$b'=b'_{п2}-2b_{и2}-b_c$	(9-106)
Ближайшие стандартные размеры стержня (мм) и его сечение (мм²)	$h_{ст}$, $b_{ст}$, $S_{ст}$ — по приложению 2	
Количество элементарных стержней в одном эффективном	Обычно $c_2=1$; при $S_{ст} \geqslant 100$ мм² можно принять $c_2=2$, 3 и 4	
Уточненные значения		
Высота паза (мм)	$h_{п2}=2h_{ст}+h_и+h_{к2}+h_{ш2}+h_c$	(9-107)
Ширина паза (мм)	$b_{п2}=b_{ст}+2b_{и2}+b_c$	(9-108)
Высота спинки ротора (мм)	h_{c2} — по (9-67)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	B_{c2} — по (9-68)	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b_{з2min}$ — по (9-90)	
Магнитная индукция в наиболее узком месте зубца (Тл)	$B_{з2max}$ — по (9-91)	
Среднее зубцовое деление ротора (мм)	$t_{ср2}=\pi(D_{н2}-h_{п2})/z_2$	(9-109)
Средняя ширина катушки обмотки (мм)	$b_{ср2}=t_{ср2}y_{п.ср2}$	(9-110)
Средняя длина лобовой части катушки **обмотки (мм):**		
при $U_к \leqslant 750$ В	$l_{л2}=1{,}2b_2+h_{п2}+50$	(9-111)
при $U_к>750$ В	$l_{л2}=1{,}2b_{р2}+h_{п2}+70$	(9-112)
Средняя длина витка обмотки (мм)	$l_{ср2}=2(l_2+l_{л2})$	(9-113)
Вылет лобовой части обмотки (мм):		
при $U_к \leqslant 750$ В	$l_{в2}=0{,}3b_{ср2}+(h_{п2}/2)+25$	(9-114)
при $U_к>750$ В	$l_{в2}=0{,}3b_{ср2}+(h_{п2}/2)+35$	(9-115)

Здесь $y_{п.ср2}$ — средний шаг секции по пазам, равной полусумме шагов с передней и с задней стороны; h_c и b_c=0,3 для $h \leqslant 355$ мм, а h_c и b_c=0,35 мм для $h \geqslant 400$ мм.

Пример расчета машины

5. Обмотка фазного ротора.

Для фазного ротора выбраны прямоугольные полузакрытые пазы.

Двухслойная волновая обмотка из медных изолированных стержней прямоугольного сечения, количество параллельных ветвей $a_2=1$; количество эффективных проводников в пазу $N_{п2}=2$.

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 2
132	w_2	(9-101)	$6 \cdot 4,5 = 27$
133	$y_{п2}$	§ 9-6	$3 \cdot 4,5 - 1/2 = 13$
134	$y'_{п2}$	§ 9-6	$3 \cdot 4,5 + 1/2 = 14$
135	$y''_{п2}$	§ 9-6	$3 \cdot 4,5 - 1/2 = 13$
136	$k_{р2}$	(9-9)	$0,5/[4,5 \sin ((60/(4,5 \cdot 2))] = 0,95$
137	β_2	§ 9-6	0,96
138	$k_{у2}$	(9-12)	$\sin (0,96 \cdot 90°) = 0,998$
139	$k_{об2}$	(9-13)	$0,956 \cdot 0,998 = 0,954$
140	$k_{тр}$	(9-102)	$68 \cdot 0,886/(27 \cdot 0,954) = 2,33$
141	E_2, В	(9-103)	$0,98 \cdot 380/2,33 = 160$
142	$U_к$, В	(9-104)	$\sqrt{3} \cdot 160 = 277$
143	$h'_{п2}$, мм	табл. 9-20	45,5
144	h'_{c2}, мм	(9-67)	$0,38 \cdot 420,2 - 45,5 - (2/3)\ 40 = 87,5$
145	B'_{c2}, Тл	(9-68)	$0,0277 \cdot 10^6/(2 \cdot 0,95 \cdot 230 \cdot 87,5) = 0,724$
146	t_2, мм	(9-69)	$\pi \cdot 420,2/81 = 16,3$
147	$B'_{з2\,max}$, Тл	табл. 9-19	1,9
148	$b'_{з2\,min}$, мм	(9-83)	$16,3 \cdot 0,875/(1,9 \cdot 0,95) = 7,9$
149	$b'_{п2}$, мм	(9-84)	$[\pi (420,2 - 2 \cdot 45,5)/81] - 7,9 = 4,87$
150	h', м	(9-105)	$(45,5 - 4,5 - 2,5 - 1,0 - 0,3)/2 = 18,6$
151	b', мм	(9-106)	$4,87 - 1,6 - 0,3 = 2,97$
152	$h_{ст}$, мм	приложение 2	18,0
153	$b_{ст}$, мм	то же	3,28
154	$S_{ст}$, мм²	»	58, 56
155	$h_{п2}$, мм	(9-107)	$2,18 + 4,5 + 2,5 + 1,0 + 0,3 = 44$
156	$b_{п2}$, мм	(9-108)	$3,28 + 1,6 + 0,3 = 5,18$
157	h_{c2}, мм	(9-67)	$0,38 \cdot 420,2 - 44,3 - (2/3) 40 = 88,7$
158	B_{c2}, Тл	(9-68)	$0,0277 \cdot 10^6/(2 \cdot 0,95 \cdot 230 \cdot 88,7) = 0,715$
159	$b_{з2\,min}$, мм	(9-90)	$[\pi (420,2 - 2 \cdot 44,3)/81] - 5,18 = 7,7$
160	$B_{з2\,max}$, Тл	(9-91)	$\dfrac{16,3 \cdot 0,875}{7,7 \cdot 0,95} = 1,95$
161	$t_{ср2}$, мм	(9-109)	$\pi (420,2 - 44,3)/81 = 14,58$
162	$b_{ср2}$, мм	(9-110)	$14,58 \cdot 13,5 = 197$
163	$l_{л2}$, мм	(9-111)	$1,2 \cdot 197 + 44,3 + 50 = 330,7$
164	$l_{ср2}$, мм	(9-113)	$2 (230 + 330,7) = 1121$
165	$l_{в2}$, мм	(9-114)	$0,3 \cdot 197 + 44,3/2 + 25 = 106,2$

§ 9-7. Расчет магнитной цепи

Основные положения. В электрических машинах с симметричной магнитной цепью, а к таким машинам относятся асинхронные двигатели, можно ограничиться расчетом МДС на полюс.

Магнитная цепь асинхронного двигателя состоит из следующих пяти однородных участков, соединенных последовательно: воздушный зазор между ротором и статором, зубцы статора, зубцы ротора, спинка статора, спинка ротора. При расчете магнитного напряжения каждого участка принимают, что магнитная индукция на участке распределена равномерно.

Расчет магнитной цепи электродвигателя производят в такой последовательности. Для каждого участка определяют его площадь поперечного сечения, магнитную индукцию, напряженность поля, среднюю длину пути магнитного потока, МДС участка, суммарную МДС.

В отличие от машин синхронных и постоянного тока расчет суммарной МДС у асинхронных двигателей проводят только для номинального режима работы. Расчет магнитной цепи ведут по основной волне магнитного поля; в соответствии с этим магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ является в расчете амплитудой основной волны.

Насыщение магнитной цепи вызывает уплощение кривой поля; соответственно при повышенной индукции магнитное сопротивление зубцов по середине полюсного деления больше, чем по краям. Учет уплощения производят в соответствии с [25] и [29]. Для облегчения расчета в приложениях 8—10 приведены таблицы намагничивания $H=f(B)$ для зубцов статора и ротора, вычисленные с учетом уплощения поля; эти таблицы используют при расчете магнитного напряжения участка зубцов. При расчете магнитной цепи условно принимают среднюю длину пути магнитного потока в спинке статора или ротора; в действительности длина этих путей различна — максимальная по краям полюсного деления и минимальная посередине. Соответственно неравномерно распределяется индукция.

Для упрощения расчета в приложениях 11—13 приведены таблицы намагничивания $H=f(B)$ для спинки статора и ротора, вычисленные с учетом синусоидального распределения индукции вдоль силовой линии; эти таблицы используют при расчете магнитного напряжения спинки статора и ротора.

Основное сопротивление магнитной цепи асинхронного двигателя сосредоточено в воздушном зазоре между ротором и статором. Это сопротивление увеличивается дополнительно из-за зубчатого строения статора и ротора; увеличение его учитывается соответствующим поправочным коэффициентом, который больше единицы. При наличии радиальных вентиляционных каналов в сердечнике статора или ротора часть магнитного потока проходит через каналы, снижая магнитное сопротивление воздушного зазора; это уменьшение учитывается коэффициентом, который меньше единицы.

При магнитной индукции в зубцах статора или ротора $B\leqslant\leqslant 1{,}8$ Тл принимают, что магнитный поток проходит только через зубцы, а напряженность магнитного поля H определяют соответственно по кривым для зубцов (см. приложения 8—10). При

B>1,8 Тл часть магнитного потока, проходящая через пазы, снижает действительную магнитную индукцию в зубцах. Это снижение учитывается коэффициентами $k_з$, зависящими от соотношения площадей рассматриваемых поперечных сечений зубца и паза, а для определения H с целью упрощения вычислений пользуются кривыми для зубцов по приложениям 14—16, рассчитанными для разных значений $k_з$ *.

У зубцов трапецеидального поперечного сечения (прямоугольные открытые или полуоткрытые пазы, верхняя часть бутылочных пазов ротора) кривая распределения напряженности поля H по высоте зубца близка к параболе. Если $B_{з\,max}>1{,}8$ Тл, то при расчете магнитного напряжения зубцов напряженность поля определяют по индукции в трех расчетных сечениях зубца—минимальном, среднем и максимальном; среднее значение H при этом рассчитывают по формуле Симпсона (9-136). Если $B_{з\,max}\leqslant 1{,}8$ Тл, то с достаточной точностью можно определять H по индукции в одном сечении зубца, расположенном на расстоянии $^1/_3$ его высоты (от окружности, соответствующей диаметру D_1).

У зубцов равновеликого поперечного сечения (трапецеидальные пазы статора, овальные закрытые и полузакрытые пазы ротора, нижняя часть бутылочных закрытых пазов ротора) напряженность поля определяют по индукции в сечении $^1/_3$ высоты зубца; при $B_з\leqslant 1{,}8$ Тл по приложениям 8—10, а при $B_з>1{,}8$ Тл— по приложениям 14—16 с учетом коэффициента $k_з$ ($B_{з1}$ и $B_{з2}$ определены в § 9-4—9-6).

Магнитную цепь рассчитывают в такой последовательности.

МДС для воздушного зазора

Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения статора	$k_{\delta 1} = 1 + b_{ш1}/(t_1 - b_{ш1} + 5\delta t_1/b_{ш1})$	(9-116)
То же, с учетом ротора	$k_{\delta 2} = 1 + b_{ш2}/(t_2 - b_{ш2} + 5\delta t_2/b_{ш2})$	(9-117)
Коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного сопротивления воздушного зазора при наличии радиальных каналов на статоре или на роторе	$k_к=1-3\delta/[l_п+3\delta(1+l_п/l_к)]$	(9-118)
То же, при совпадающих каналах на статоре и на роторе	$k_К = 1 - \dfrac{1{,}5\delta}{l_п + 1{,}5\delta\,(1 + l_п/l_К)}$	(9-119)
Общий коэффициент воздушного зазора	$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} k_К$	(9-120)
МДС для воздушного зазора (А)	$F_\delta = 0{,}8\delta k_\delta B_\delta \cdot 10^3$	(9-121)

Здесь при открытых пазах в (9-116) и (9-117) вместо $b_{ш1}$ и $b_{ш2}$ следует подставить соответственно $b_{п1}$ и $b_{п2}$. При отсутствии радиальных каналов (на статоре или на роторе) следует принимать $k_к=1$, $l_п$ — длина пакета.

* При наличии в сердечниках статора и ротора радиальных вентиляционных каналов значения коэффициента $k_з$, определяемые по приведенным ниже формулам, следует умножить на отношение $l_1/(l_1-n_{к1}l_{к1})$.

МДС для зубцов при трапецеидальных полузакрытых пазах статора (рис. 9-7)

При $B_{з1} \leqslant 1{,}8$ Тл:		
напряженность магнитного поля	$H_{з1}$ (А/см) — из приложений 8—10	
При $B_{з1} > 1{,}8$ Тл:		
зубцовое деление на $^1/_3$ высоты зубца (мм)	$t_{1(1/3)} = \pi(D_1 + (2/3)h_{п1})/z_1$	(9-122)
коэффициент зубцов	$k_{з(1/3)} = t_{1(1/3)}/(b_{з1}k_c)$	(9-123)
напряженность магнитного поля (А/см)	$H_{з1}$ — из приложений 14—16	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{з1} = h_{п1}$	(9-124)
МДС для зубцов (А)	$F_{з1} = 0{,}1H_{з1}L_{з1}$	(9-125)

МДС для зубцов при прямоугольных открытых и полуоткрытых пазах статора (рис. 9-9)

При $B_{з1max} \leqslant 1{,}8$ Тл:		
зубцовое деление на $^1/_3$ высоты зубца	$t_{1(1/3)}$ (мм) — по (9-122)	
ширина зубца (мм)	$b_{з1(1/3)} = t_{1(1/3)} - b_{п1}$	(9-126)
магнитная индукция на $^1/_3$ высоты зубца (Тл)	$B_{з1\,(1/3)} = t_1 B_\delta / (b_{з1\,(1/3)} k_c)$	(9-127)
напряженность магнитного поля в зубцах	$H_{з1}$ (А/см) — из приложений 8—10	
При $B_{з1max} > 1{,}8$ Тл:		
зубцовое деление статора (мм): по диаметру D_1; в минимальном сечении зубца	t_1 — по (9-22): t_{1min} — по (9-46)	
в максимальном сечении зубца	$t_{1max} = \pi(D_1 + 2h_п)/z_1$	(9-128)
Ширина зубца (мм):		
в наиболее узкой части	$b_{з1min}$ — по (9-58)	
в наиболее широкой части	$b_{з1max} = t_{1max} - b_{п1}$	(9-129)
в средней части	$b_{з1ср} = (b_{з1min} + b_{з1max})/2$	(9-130)
Магнитная индукция зубца статора (Тл):		
в наиболее узкой части	$B_{з1max}$ — по (9-59)	
в наиболее широкой части	$B_{з1\,min} = t_1 B_\delta / (b_{з1\,max} k_c)$	(9-131)
в средней части	$B_{з1ср} = t_1 B_\delta / (b_{з1ср} k_c)$	(9-132)
Коэффициент зубцов:		
в наиболее узкой части	$k_{з1max} = [t_{1min}/(b_{з1min}k_c)] - 1$	(9-133)
в наиболее широкой части *	$k_{з1min} = [t_{1max}/(b_{з1max}k_c)] - 1$	(9-134)
в средней части *	$k_{з1ср} = (k_{з1max} + k_{з1min})/2$	(9-135)
Напряженность магнитного поля (А/см):		
в наиболее узкой части	$H_{з1max} = f(B_{з1max},\ k_{з1max})$ — из приложений 14—16	
в наиболее широкой части	$H_{з1min} = f(B_{з1min},\ k_{з1min})$ — из приложений 8—10 или 14—16	
в средней части	$H_{з1ср} = f(B_{з1ср},\ k_{з1ср})$ — из приложений 8—10 или 14—16	
Среднее значение напряженности магнитного поля в зубцах (А/см)	$H_{з1} = (H_{з1max} + 4H_{з1ср} + H_{з1min})/6$	(9-136)

Средняя длина пути (мм) магнитного потока — $L_{з1}$ по (9-124)

МДС для зубцов (А) — $F_{з1}$ по (9-125)

МДС для зубцов при овальных полузакрытых и закрытых пазах ротора (рис. 9—10 *а*, *б*)

При $B_{з2} \leqslant 1{,}8$ Тл:

напряженность магнитного поля (А/см) — $H_{з2}$ — из приложений 8—10

При $B_{з2} > 1{,}8$ Тл:

зубцовое деление на 1/3 высоты зубца (мм)
$$t_{2(1/3)} = \pi(D_{н2} - \frac{4}{3}h_{п2})/z_2 \quad (9\text{-}137)$$

коэффициент зубцов
$$k_{з2(1/3)} = [t_{2(1/3)}/(b_{з2}k_с)] - 1 \quad (9\text{-}138)$$

напряженность магнитного поля (А/см) — $H_{з2}$ — из приложений 14—16

Средняя длина пути магнитного потока (мм)
$$L_{з2} = h_{п2} - 0{,}2r_2 \quad (9\text{-}139)$$

МДС для зубцов (А)
$$F_{з2} = 0{,}1H_{з2}L_{з2} \quad (9\text{-}140)$$

МДС для зубцов при бутылочных закрытых пазах ротора (рис. 9-10, *в*)

Средняя ширина верхней части зубца (мм)
$$b_{з.в2} = \pi(D_{н2} - 2h_2 - h)/z_2 - b \quad (9\text{-}141)$$

Магнитная индукция в среднем сечении верхней части зубца (Тл); обычно — менее 1,8 Тл
$$B_{з.в2} = t_2B_\delta/(b_{з.в2}k_с) \quad (9\text{-}142)$$

Напряженность магнитного поля в верхней части зубца (А/см) — $H_{з.в2}$ — из приложений 8—10

Средняя длина пути магнитного потока (мм)
$$L_{з.в2} = h_2 + h \quad (9\text{-}143)$$

МДС для верхней части зубца (А)
$$F_{з.в2} = 0{,}1H_{з.в2}L_{з.в2} \quad (9\text{-}144)$$

Магнитная индукция в нижней части зубца (Тл)
$$B_{з.н2} = t_2B_\delta/(b_{з.н2}k_с) \quad (9\text{-}145)$$

При $B_{з.н2} \leqslant 1{,}8$ Тл:

напряженность поля (А/см) в нижней части зубца — $H_{з.н2}$ — из приложений 8—10

При $B_{з.н2} > 1{,}8$ Тл:

зубцовое деление на 1/3 высоты зубца (мм)
$$t_{н2(1/3)} = \pi\left[D_{н2} - \frac{4}{3}h_{п2} - \frac{2}{3}(h_2 + h)\right]\Big/ z_2 \quad (9\text{-}146)$$

коэффициент зубцов
$$k_{з.н(1/3)} = [t_{н2(1/3)}/(b_{з.н2}k_с)] - 1 \quad (9\text{-}147)$$

напряженность магнитного поля (А/см) в нижней части зубца — $H_{з.н2}$ — из приложений 14—16

Средняя длина пути магнитного потока в нижней части зубца (мм)
$$L_{з.н2} = r_1 + h_1 + 0{,}8r_2 \quad (9\text{-}148)$$

МДС для нижней части зубца (А)
$$F_{з.н2} = 0{,}1H_{з.н2}L_{з.н2} \quad (9\text{-}149)$$

МДС для зубцов ротора (А)
$$F_{з2} = F_{з.в2} + F_{з.н2} \quad (9\text{-}150)$$

МДС для зубцов при прямоугольных пазах ротора (рис. 9—11)

При $B_{з2max} \leqslant 1{,}8$ Тл:

зубцовое деление на 1/3 высоты зубца (мм)
$$t_{2(1/3)} = \pi(D_{н2} - \frac{4}{3}h_{п2})/z_2 \quad (9\text{-}151)$$

ширина зубца на 1/3 высоты (мм)
$$b_{з2(1/3)} = t_{2(1/3)} - b_{п2} \quad (9\text{-}152)$$

магнитная индукция в зубцах (Тл)	$B_{з2\,(1/3)} = t_2 B_\delta / (b_{з2\,(1/3)} k_c)$	(9-153)
напряженность магнитного поля (А/см)	$H_{з2}$ — из приложений 8—10	
При $B_{з2max} > 1{,}8$ Тл:		
зубцовое деление ротора (мм)	t_2 — по (9-69)	
зубцовое деление ротора в минимальном сечении зубца (мм)	$t_{2min} = \pi (D_{н2} - 2h_{п2}) / z_2$	(9-154)
ширина зубца (мм):		
в наиболее узкой части	$b_{з2min} = t_{2min} - b_{п2}$	(9-155)
в наиболее широкой части	$b_{з2max} = t_2 - b_{п2}$	(9-156)
в средней части	$b_{з2ср} = (b_{з2min} + b_{з2max}) / 2$	(9-157)
магнитная индукция в зубцах ротора (Тл): в наиболее узкой части	$B_{з2max}$ — по (9-91)	
в наиболее широкой части	$B_{з2\,min} = t_2 B_\delta / (b_{з2\,max} k_c)$	(9-158)
в средней части	$B_{з2ср} = t_2 B_\delta / (b_{з2ср} k_c)$	(9-159)
коэффициент зубцов в наиболее узкой части	$k_{з2max} = [t_{2min} / (b_{з2min} k_c) - 1$	(9-160)
в наиболее широкой части *	$k_{з2min} = [t_2 / (b_{з2max} k_c)] - 1$	(9-161)
в средней части *	$k_{з2ср} = (k_{з2max} + k_{з2min}) / 2$	(9-162)
напряженность магнитного поля (А/см):		
в наиболее узкой части	из приложений 14—16	
в наиболее широкой части	$H_{з2min} = f(B_{з2min},\ k_{з2min})$ — из приложений 8—10 или 14—16	
в средней части	$H_{з2ср} = f(B_{з2ср},\ k_{з2ср})$ — из приложений 8—10 или 14—16	
среднее значение напряженности магнитного поля в зубцах (А/см)	$H_{з2} = (H_{з2max} + 4H_{з2ср} + H_{з2min}) / 6$	(9-163)
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{з2} = h_{п2}$	(9-164)
МДС для зубцов (А)	$F_{з2} = 0{,}1 H_{з2} L_{з2}$	(9-165)

МДС для спинки статора

Напряженность магнитного поля (А/см):		
при $2p=2$ и $B_{c1} \leqslant 1{,}4$ Тл, а также при $2p \geqslant 4$	H_{c1} — из приложений 11—13	
при $2p=2$ и $B_{c1} > 1{,}4$ Тл	H_{c1} — из приложений 5—7; при этом значение B_{c1}, выбранное из табл. 9-13, уменьшают на 0,4 Тл	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{c1} = \pi (D_{н1} - h_{c1}) / (4p)$	(9-166)
МДС для спинки статора (А)	$F_{c1} = 0{,}1 H_{c1} L_{c1}$	(9-167)

МДС для спинки ротора

Напряженность магнитного поля (А/см):		
при $2p=2$	H_{c2} — из приложений 11—13;	
при $2p \geqslant 4$	H_{c2} — из приложений 5—7	
средняя длина пути магнитного потока (мм):		
при $2p=2$	$L_{c2} = h_{c2} + 2d_{к2}/3$	(9-168)
при $2p \geqslant 4$	$L_{c2} = \pi \left(D_2 + h_{c2} + \frac{4}{3} d_{к2} \right) \Big/ (4p)$	(9-169)

МДС для спинки ротора (А)	$F_{c2}=0,1H_{c2}L_{c2}$	(9-170)
Параметры магнитной цепи		
Суммарная МДС магнитной цепи на один полюс (А)	$F_\Sigma = F_\delta + F_{з1} + F_{з2} + F_{c1} + F_{c2}$	(9-171)
Коэффициент насыщения магнитной цепи	$k_{нас} = F_\Sigma/F_\delta$	(9-172)
Намагничивающий ток (А)	$I_м = 2,22F_\Sigma p/(m_1 w_1 k_{об1})$	(9-173)
То же, в относительных единицах	$I_{м*}=I_м/I_1$	(9-174)
ЭДС холостого хода (В)	$E=k_н U_1$	(9-175)
Главное индуктивное сопротивление (Ом)	$x_м=E/I_м$	(9-176)
То же, в относительных единицах	$x_{м*}=x_м I_1/U_1$	(9-177)

Примеры расчета машин

6. Расчет магнитной цепи

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель
166	$k_{\delta 1}$	(9-116)	$1+\frac{3,5}{13,3-3,5+5}\times\frac{1}{0,35\cdot 13,3/3,5}=1,21$	$1+\frac{5,5}{18,4-5,5+5\cdot 0,9}\times\frac{1}{18,4/5,5}=1,2$
167	$k_{\delta 2}$	(9-117)	$1+\frac{1,5}{14-1,5+5}\times\frac{1}{0,35\cdot 14/1,5}=1,052$	$1+\frac{1,5}{16,3-1,5+5\cdot 0,9}\times\frac{1}{16,3/1,5}=1,024$
168	$k_к$	§ 9-7	1,0	1,0
169	k_δ	(9-120)	$1,21\cdot 1,052\cdot 1,0=1,27$	$1,2\cdot 1,024\cdot 1,0=1,23$
170	F_δ, А	(9-121)	$0,8\cdot 0,35\cdot 1,27\times 0,9\cdot 10^3=320$	$0,8\cdot 0,9\cdot 1,23\cdot 0,875\times 10^3=775$
171	$t_{1\,(1/3)}$, мм	(9-122)	$\pi(153+2\cdot 18,5/3)/36=14,4$	$\pi(422+2\cdot 38/3)/72=19,5$
172	$k_{з\,(1/3)}$	(9-123)	$14,4/(6,67\cdot 0,97)=2,23$	—
173	$H_{з1}$, А/см	приложение 14	15,2	—
174	$b_{з1\,(1/3)}$, мм	(9-126)	—	$19,5-9,5=10$
175	$B_{з1\,(1/3)}$, Тл	(9-127)	—	$18,4\cdot 0,875/(0,95\times 10)=1,69$
176	$H_{з1}$, А/см	приложение 9	—	18,4
177	$L_{з1}$, мм	(9-124)	18,5	38
178	$F_{з1}$, А	(9-125)	$0,1\cdot 15,2\cdot 18,5=28,1$	$0,1\cdot 18,4\cdot 38=70$
179	$H_{з2}$, А/см	приложение 8	11,5	—
180	$L_{з2}$, мм	(9-139)	$25,5-0,2\cdot 1=25,3$	—
181	$F_{з2}$, А	(9-140)	$0,1\cdot 11,5\cdot 25,3=29$	—
182	$t_{2\,min}$, мм	(9-154)	—	$\pi(420\cdot 2-2\cdot 44,3)/81=12,9$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
183	$b_{з2\,min}$, мм	(9-155)	—	12,9—5,18=7,7
184	$b_{з2\,max}$, мм	(9-156)	—	16,3—5,18=11,1
185	$b_{з2ср}$, мм	(9-157)	—	(7,7+11,1)/2=9,4
186	$B_{з2\,max}$, Тл	(9-91)	—	16,3·0,875/(7,7× ×0,95)=1,95
187	$B_{з2\,min}$, Тл	(9-158)	—	16,3·0,875/(11,1× ×0,95)=1,35
188	$B_{з2ср}$, Тл	(9-159)	—	16,3·0,875/(9,4× ×0,95)=1,6
189	$k_{з2\,max}$	(9-160)	—	[12,9/(7,7·0,95)]— —1=0,76
190	$H_{з2\,max}$, А/см	приложение 15	—	45
191	$H_{з2\,min}$, А/см	приложение 9	—	8
192	$H_{з2ср}$, А/см	То же	—	14,5
193	$H_{з2}$, А/см	(9-163)	—	$\frac{(45+4\cdot 14,5+8)}{6}=18,5$
194	$L_{з2}$, мм	(9-164)	—	44,3
195	$F_{з2}$, А	(9-165)	—	0,1·18,5·44,3=82
196	H_{c1}, А/см	приложение 11	9,4	—
197	H_{c1}, А/см	приложение 12	—	10,9
198	L_{c1}, мм	(9-166)	π(233—21,4)/(4·2)= =83,1	π(590—46)/(4·3)= =142
199	F_{c1}, А	(9-167)	0,1·9,4·83,1=78	0,1·10,9·142=155
200	H_{c2}, А/см	приложение 5	0,7	—
201	H_{c2}, А/см	приложение 6	—	0,795
202	L_{c2}, мм	(9-169)	π(54+32,4)/(4·2)= =33,9	π(140+88,7+4× ×40/3)/(4·3)=73,8
203	F_{c2}, А	(9-170)	0,1·0,7·33,9=2,4	0,1·0,795·73,8=5,9
204	F_{Σ}, А	(9-171)	320+28,1+29+78+ +2,4=457,5	775+70+82+155+ +5,9=1088
205	$k_{нас}$	(9-172)	457,5/320=1,43	1088/775=1,4
206	$I_{м}$, А	(9-173)	$\frac{2,22\cdot 457,5\cdot 2}{3\cdot 126\cdot 0,96}=5,6$	$\frac{2,22\cdot 1088\cdot 3}{3\cdot 68\cdot 0,886}=40,1$
207	$I_{м*}$, о. е.	(9-174)	5,6/15,2=0,37	40,1/171,5=0,234
208	E, В	(9-175)	0,97·220=213	0,98·380=372,4
209	$x_{м}$, Ом	(9-176)	213/5,6=38	372,4/40,1=9,3
210	$x_{м*}$, о. е.	(9-177)	38·15,2/220=2,63	9,3·171,5/380=4,2

§ 9-8. Активные и индуктивные сопротивления обмоток

Основные положения. Определение активных и индуктивных сопротивлений статора и ротора — параметров схемы замещения асинхронной машины — необходимо для расчета режима х. х., но-

минальных параметров, рабочих и пусковых характеристик, а также построения круговых диаграмм.

Активные сопротивления рассчитывают для температуры 20 °С, а при определении потерь их приводят к стандартной рабочей температуре по ГОСТ 183—74, как указано в § 4-2, путем умножения их на коэффициент $m_т$.

При расчете индуктивных сопротивлений поле рассеяния условно разбивают на три составляющие: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмоток. Для каждой составляющей определяют магнитную проводимость ($\lambda_п$; $\lambda_д$; $\lambda_л$); суммируют эти проводимости и по ним рассчитывают индуктивное сопротивление.

Проводимость пазового рассеяния зависит от формы и размеров паза. В двухслойных обмотках с укороченным шагом в некоторых пазах располагаются катушки или стержни, принадлежащие разным фазам, вследствие чего потокосцепление такой обмотки уменьшается. Это явление учитывается введением в расчетные формулы коэффициентов $k_{\beta 1}$ и $k'_{\beta 1}$, зависящих от β_1.

Проводимость дифференциального рассеяния обусловлена высшими гармоническими. Высшие гармоники поля статора наводят токи в обмотке ротора; демпфирующую реакцию этих токов учитывают только при короткозамкнутом роторе. Скос пазов уменьшает демпфирующую реакцию токов.

Проводимость рассеяния лобовых частей обмотки зависит от количества пазов на полюс и фазу, длины лобовой части катушки и от укорочения шага обмотки.

При пуске асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, имеющим глубокие пазы или двойную клетку, в том числе и в виде бутылочного паза, возникает явление вытеснения тока в обмотке ротора, которое приводит к увеличению активного и уменьшению индуктивного сопротивления этой обмотки.

Кроме того, при пуске, а также в режимах работы от $s=1$ до s_{max} (соответствующем M_{max}) следует учитывать явление насыщения путей потоков рассеяния, которое зависит от величины токов, протекающих в пазах, и уменьшает индуктивные сопротивления статора и ротора. Таким образом, разным режимам работы двигателя — номинальному, пусковому и при M_{max} — соответствуют различные значения r'_2, x_1 и x'_2.

В настоящем разделе приведены формулы для определения активных и индуктивных сопротивлений обмоток при температуре 20 °С и без учета влияния явлений вытеснения тока в обмотке короткозамкнутого ротора и насыщения путей потоков рассеяния статора и ротора.

Активные и индуктивные сопротивления обмотки статора в относительных единицах (r_{1*}, x_{1*}) можно определить по разным формулам, но результат должен быть одинаков. Этим проверяется правильность определения r_1 и x_1. О правильности расчета x'_2 можно примерно судить по отношению $x_1/x'_2=0,7\div1,0$.

Сопротивление обмотки статора. Расчет сопротивления обмотки статора проводят в такой последовательности.

Активное сопротивление обмотки фазы при 20 °С (Ом)

$$r_1 = w_1 l_{\text{ср}1}/(\rho_{\text{м}20} a_1 c s \cdot 10^3) \qquad (9\text{-}178)$$

То же (о. е.)

$$r_{1*} = r_1 I_1/U_1 \qquad (9\text{-}179)$$

Проверка правильности определения r_{1*} (о. е.)

$$r_{1*} = \pi D_1 (A_1 J_1) l_{\text{ср}1}/(114 \cdot 10^4 m_1 U_1 I_1) \qquad (9\text{-}180)$$

Коэффициенты, учитывающие укорочение шага

при $\beta_1 = 0{,}65 \div 1{,}0$

$$k_{\beta1} = 0{,}4 \div 0{,}6\beta_1 \qquad (9\text{-}181)$$

$$k'_{\beta1} = 0{,}2 + 0{,}8\beta_1 \qquad (9\text{-}182)$$

при $\beta_1 < 0{,}65$

$$k_{\beta1} = 0{,}2 + 0{,}85\beta_1 \qquad (9\text{-}183)$$

$$k'_{\beta1} = 1{,}1\beta_1 \qquad (9\text{-}184)$$

Коэффициент проводимости рассеяния:

для трапецеидального полузакрытого паза (рис. 9-7)

$$\lambda_{\text{п}1} = \frac{h_1}{3b_2} k_{\beta1} + \left(\frac{3h_{\text{к}1}}{b_2 + 2b_{\text{ш}1}} + \frac{h_{\text{ш}1}}{b_{\text{ш}1}} + \frac{h_2}{b_2}\right) k'_{\beta1} \qquad (9\text{-}185)$$

для прямоугольного полуоткрытого паза (рис. 9-9)

$$\lambda_{\text{п}1} = \frac{h_3}{4b_{\text{п}1}} + \frac{h_1 - h_3}{3b_{\text{п}1}} k_{\beta1} + \left(\frac{3h_{\text{к}1}}{b_{\text{п}1} + 2b_{\text{ш}1}} + \frac{h_{\text{ш}1}}{b_{\text{ш}1}} + \frac{h_2}{b_{\text{п}1}}\right) k'_{\beta1} \qquad (9\text{-}186)$$

для прямоугольного открытого паза (рис. 9-9)

$$\lambda_{\text{п}1} = \frac{h_3}{4b_{\text{п}1}} + \frac{h_1 - h_3}{3b_{\text{п}1}} k_{\beta1} + \left(\frac{h_{\text{к}1} + h_{\text{ш}1} + h_2}{b_{\text{п}1}}\right) k'_{\beta1} \qquad (9\text{-}187)$$

Коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов статора на проводимость дифференциального рассеяния

$$k_{\text{ш}1} = 1 - [0{,}033 b^2_{\text{ш}1}/(t_{1\min}\delta)] \qquad (9\text{-}188)$$

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{\text{д}1} = 0{,}9 (t_{1\min} k_{\text{об}1})^2 k_{\text{р}1} k_{\text{ш}1} k_{\text{д}1}/(\delta k_\delta) \qquad (9\text{-}189)$$

Полюсное деление (мм)

$$\tau = \pi D_1/(2p) \qquad (9\text{-}190)$$

Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки

$$\lambda_{\text{л}1} = 0{,}34 \frac{q_1}{l_1} (l_{\text{л}1} - 0{,}64\beta\tau_1) \qquad (9\text{-}191)$$

Коэффициент проводимости рассеяния обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{п}1} + \lambda_{\text{д}1} + \lambda_{\text{л}1} \qquad (9\text{-}192)$$

Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора (Ом)

$$x_1 = 1{,}58 f_1 l_1 w^2_1 \lambda_1/(p q_1 10^8) \qquad (9\text{-}193)$$

Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора (о. е.)

$$x_{1*} = x_1 I_1/U_1 \qquad (9\text{-}194)$$

Проверка правильности определения x_{1*} (о. е.)

$$x_{1*} = 0{,}39 (D_1 A_1)^2 l_1 \lambda_1 \cdot 10^{-7}/(m_1 U_1 I_1 z_1) \qquad (9\text{-}195)$$

Здесь $\rho_{\text{м}20} = 57$ См/мкм — удельная электрическая проводимость меди при 20 °С; $h_{\text{к}1}$, h_2, h_3 — размеры частей обмоток и паза (рис. 9-7 и 9-9), определяемые по табл. 9-21; размер обмотки $h_1 = h_{\text{п}1} - h_{\text{ш}1} - h_{\text{к}1} - h_2 - h_4$; $k_{\text{р}1}$ — коэффициент, учитывающий демпфирующую реакцию токов, наведенных в обмотке короткозамкну-

Таблица 9-21

Форма паза статора	Высоты, мм			
	h	$h_{к1}$	h_2	h_3, h_4
Полузакрытая	50—132 160—250 280—315	0,7 1,0 3,0	0,6	0 0,4 0,4
Полуоткрытая и открытая	280—355 400—450	3,0 3,5	1,9 2,55	1,0 5,0

Таблица 9-22

q_1	$k_{р1}$ при следующих значениях z_2/p						
	10	15	20	25	30	35	40
2	$\frac{0,99}{0,94}$	$\frac{0,95}{0,87}$	—	—	—	—	—
3	$\frac{0,98}{0,92}$	$\frac{0,93}{0,87}$	$\frac{0,88}{0,84}$	$\frac{0,85}{0,78}$	—	—	—
4	—	$\frac{0,90}{0,81}$	$\frac{0,84}{0,77}$	$\frac{0,80}{0,75}$	$\frac{0,77}{0,72}$	—	—
5	—	—	—	$\frac{0,75}{0,69}$	$\frac{0,72}{0,67}$	$\frac{0,70}{0,65}$	—
6	—	—	—	$\frac{0,7}{0,62}$	$\frac{0,66}{0,60}$	$\frac{0,62}{0,58}$	
8	—	—	—	—	—	$\frac{0,53}{0,47}$	$\frac{0,51}{0,46}$

Примечания: 1. В числителе приведены значения $k_{р1}$ при скосе пазов $b_с=t_2$, а в знаменателе — при отсутствии скоса пазов. 2. Для значений z_2/p, отличающихся от приведенных в таблице и для дробных q_1, коэффициент следует определять интерполяцией.

Таблица 9-23

q_1	Коэффициент $k_{д1}$			q_1	Коэффициент $k_{д1}$		
	однослойная обмотка с диаметральным шагом	двухслойная обмотка с укороченным шагом для ротора			однослойная обмотка с диаметральным шагом	двухслойная обмотка с укороченным шагом для ротора	
		короткозамкнутого	фазного			короткозамкнутого	фазного
1,5	—	0,045	0,470	4	0,0089	0,0062	0,0062
2	0,0285	0,0235	0,0235	5	0,0065	0,0043	0,0043
2,5	—	0,0170	0,0180	6	0,0052	0,0030	0,0030
3	0,0141	0,0111	0,0111	8	—	0,0021	0,0021

того ротора высшими гармониками поля статора (для двигателей с фазным ротором $k_{р1}=1$; для двигателей с короткозамкнутым ротором значения $k_{р1}$ приведены в табл. 9-22); $k_{д1}$ — коэффициент дифференциального рассеяния статора, равный отношению суммы ЭДС, наведенных высшими гармониками поля статора, к ЭДС, наведенной первой гармоникой того же поля; $k_{д1}$ определяют по табл. 9-23.

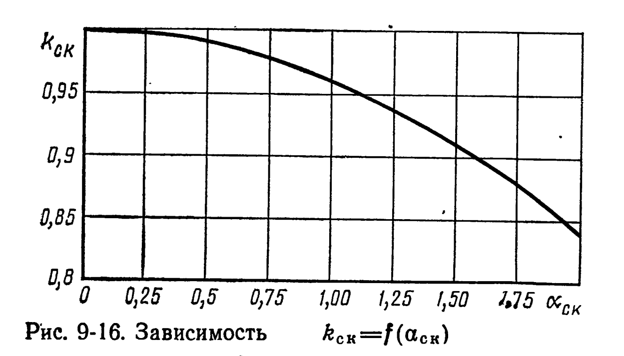


Рис. 9-16. Зависимость $k_{ск}=f(\alpha_{ск})$

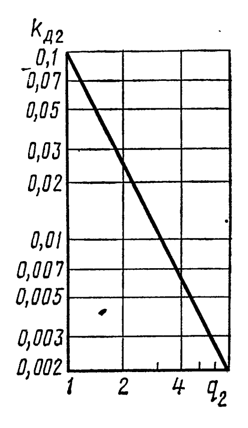


Рис. 9-17. Зависимость $k_{д2}=f(q_2)$ для короткозамкнутого ротора

Сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами. Расчет сопротивления обмотки ротора проводят в такой последовательности.

Активное сопротивление стержня клетки при 20 °С (Ом)	$r_{ст}=l_2/(\rho_{а\,20}S_{ст}\cdot 10^3)$	(9-196)
Коэффициент приведения тока кольца к току стержня	$k_{пр2}=2\sin(\pi p/z_2)$	(9-197)
	при $t_2/(2p)\geqslant 6$: $k_{пр2}=2\pi p/z_2$	(9-198)
Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня при 20 °С (Ом)	$r_{кл}=2\pi D_{кл.ср}/(\rho_{а\,20}z_2S_{кл}k^2_{пр2}10^3)$	(9-199)
Центральный угол скоса пазов (рад)	$\alpha_{ск}=2pt_1\beta_{ск1}/D_1$	(9-200)
Коэффициент скоса пазов ротора	$k_{ск}$ — по рис. 9-16	
Коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора	$k_{пр1}=\dfrac{4m_1}{z_2}\left(\dfrac{w_1k_{об1}}{k_{ск}}\right)^2$	(9-201)
Активное сопротивление обмотки ротора при 20 °С, приведенное к обмотке статора (Ом)	$r'_2=k_{пр1}(r_{от}+r_{кл})$	(9-202)
Активное сопротивление обмотки ротора при 20 °С, приведенное к обмотке статора (о. е.)	$r'_{2*}=r'_2I_1/U_1$	(9-203)
Ток стержня ротора для рабочего режима (А)	$I_2=\dfrac{2w_1k_{об1}P_2}{U_1z_2}\dfrac{(0,2+0,8\cos\varphi')\,10^3}{\eta'\cos\varphi'}$	(9-204)

Коэффициент проводимости рассеяния:

для овального полузакрытого паза ротора (рис. 9-10,*а*)

$$\lambda_{п2}=\frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}+\frac{h_1+0{,}8r_2}{6r_1}\left(1-\frac{\pi r_1^2}{2S_{ст}}\right)^2+0{,}66-\frac{b_{ш2}}{4r_1}, \qquad (9\text{-}205)$$

для овального закрытого паза (рис. 9-10,*б*)

$$\lambda_{п2}=1{,}12\,\frac{h_2}{I_2}\,10^3+\frac{h_1+0{,}8r_2}{6r_1}\times\left(1-\frac{\pi r_1^2}{2S_{ст}}\right)^2+0{,}66-\frac{b_{ш2}}{4r_1}+0{,}3 \qquad (9\text{-}206)$$

Количество пазов ротора на полюс и фазу

$$q_2=z_2/(2pm_1) \qquad (9\text{-}8а)$$

Коэффициент дифференциального рассеяния ротора

$k_{д2}=f(q_2)$ — по рис. 9-17

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{д2}=0{,}9t_2\,(z_2/6p)^2k_{д2}/(\delta k_\delta) \qquad (9\text{-}207)$$

Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец литой клетки

$$\lambda_{кл}=\frac{2{,}9D_{кл.ср}}{z_2l_2k^2_{пр2}}\lg\frac{2{,}35D_{кл.ср}}{h_{кл}+l_{кл}} \qquad (9\text{-}208)$$

Относительный скос пазов ротора, в долях зубцового деления ротора

$$\beta_{ск2}=\beta_{ск}t_1/t_2 \qquad (9\text{-}209)$$

Коэффициент проводимости рассеяния скоса пазов

$$\lambda_{ск}=t_2\beta^2_{ск2}/(9{,}5\delta k_\delta k_{нас}) \qquad (9\text{-}210)$$

Коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора

$$\lambda_2=\lambda_{п2}+\lambda_{д2}+\lambda_{кл}+\lambda_{ск} \qquad (9\text{-}211)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора (Ом)

$$x_2=7{,}9f_1l_2\lambda_2\cdot10^{-9} \qquad (9\text{-}212)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора (Ом)

$$x'_2=k_{пр1}x_2 \qquad (9\text{-}213)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора (о. е.)

$$x'_{2*}=x'_2I_1/U_1 \qquad (9\text{-}214)$$

Проверка правильности определения x'_2

$$x_1/x'_2\approx0{,}7\div1{,}0 \qquad (9\text{-}215)$$

Здесь $\rho_{a\,20}$ — удельная электрическая проводимость алюминия при 20 °С [при использовании для заливки беличьей клетки ротора алюминия А5 (обычно применяемый) $\rho_{a\,20}=27$ См/мкм, при использовании алюминиевого сплава АКМ12-4 (для асинхронных двигателей с повышенным скольжением) $\rho_{a\,20}=15$ См/мкм].

Сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора с бутылочными закрытыми пазами. На рис. 9-18 приведена схема замещения ротора с бутылочными пазами. Обычно такие роторы выполняют без скоса пазов. Высота верхней части бутылочного паза $h\leqslant15$ мм; вытеснение тока при пуске двигателя в этой части паза можно не учитывать. Для нижней части паза расчет проводят так же, как для овального паза с заменой индексов (добавления в индексе буквы «н»).

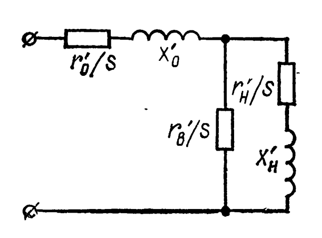


Рис. 9-18. Схема замещения ротора с бутылочными пазами

Расчет сопротивления обмотки ротора проводят в такой последовательности.

Активное сопротивление верхней части стержня при 20 °С (Ом) $r_{ст.в}=l_2/(\rho_{a\,20}S_{ст.в}10^3)$ (9-216)

Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня, при 20 °С $r_{кл}$ (Ом) — по (9-199)

Активное сопротивление верхней части стержня, приведенное к статору, при 20 °С (Ом) $r'_{ст.в}=k_{пр1}r_{ст.в}$ (9-217)

Активное сопротивление нижней части стержня при 20 °С (Ом) $r_{ст.н}=l_2/(\rho_{a\,20}S_{ст.н}10^3)$ (9-218)

Активное сопротивление нижней части стержня, приведенное к статору, при 20 °С (Ом) $r'_{ст.н}=k_{пр1}r_{ст.н}$ (9-219)

Активное сопротивление короткозамыкающих колец (общей цепи ротора), приведенное к статору, при 20 °С (Ом) $r'_0=k_{пр1}r_{кл}$ (9-220)

Активное результирующее сопротивление ротора, при 20 °С (Ом)

$$r'_2=r'_0+\frac{r'_{ст.в}r'_{ст.н}}{r'_{ст.в}+r'_{ст.н}} \qquad (9\text{-}221)$$

Коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки

$$\lambda_{2н}=\left[\frac{h_1+0,8r_2}{6r_1}\left(1-\frac{\pi r^2_1}{2S_{ст.н}}\right)^2+\right.$$

$$\left.+0,66-\frac{b}{4r_1}\right]+\frac{h-0,18}{2b} \qquad (9\text{-}222)$$

Суммарный ток (A) верхней и нижней частей стержня I_2 — по (9-204)

Коэффициент проводимости рассеяния взаимной индукции нижнего и верхнего пазов $\lambda_{н.в}=1,12h_2 10^3/I_2+$ $+(h+0,1b)/(2b)+1,09$ (9-223)

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_{д2}$ — по (9-207)

Коэффициент проводимости рассеяния корткозамыкающих колец $\lambda_{кл}$ — по (9-208)

Коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора $\lambda_{2о}=\lambda_{н.в}+\lambda_{д2}+\lambda_{кл}$ (9-224)

Приведенный коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки $\lambda'_{2н}=\lambda_{2н}l_2z_1k^2_{об}/(l_1z_2)$ (9-225)

Приведенный коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора $\lambda'_{2о}=\lambda_{2о}l_2z_1k^2_{об}/(l_1z_2)$ (9-226)

Индуктивное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору (Ом) $x'_н=x_1\lambda'_{2н}/\lambda_1$ (9-227)

Индуктивное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору (Ом) $x'_о=x_1\lambda'_{2о}/\lambda_1$ (9-228)

Индуктивное результирующее сопротивление (Ом)

$$x'_2=x'_0+x'_н\left(\frac{S_{ст.н}}{S_{ст.н}+S_{ст.в}}\right)^2 \qquad (9\text{-}229)$$

Активное приведенное результирующее сопротивление ротора (о. е.) r'_{2*} — по (9-203)

Индуктивное приведенное результирующее сопротивление обмотки ротора (о. е.) x'_{2*} — по (9-214)

Сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора с прямоугольными открытыми пазами и сварной клеткой. Расчет сопротивлений обмотки ротора с прямоугольными открытыми пазами и сварной клеткой проводят аналогично расчету для ротора с овальными пазами, но со следующими особенностями. При определении активного сопротивления стержня клетки необходимо в (9-196) добавить слагаемое, учитывающее сопротивление лобовых частей стержня (Ом)

$$r_{\text{ст.л}} = (l_{\text{ст}} - l_2)/(\rho_{a20} S_{\text{ст}} \cdot 10^3), \qquad (9\text{-}230)$$

а также принять проводимость алюминиевых стержней при 20° С равной 30; поэтому в (9-196) в знаменателе следует подставить $\rho_{a20} = 30$.

Как правило, двигатели с прямоугольными открытыми пазами ротора и со сварной клеткой выполняются без скоса пазов; поэтому $k_{\text{ск}} = 0$ и $\lambda_{\text{ск}} = 0$. Коэффициент проводимости рассеяния прямоугольного открытого паза

$$\lambda_{\text{п}2} = (h_{\text{п}2} - h_{\text{ш}2})/(3b_{\text{п}2}) + h_{\text{ш}2}/b_{\text{п}2}. \qquad (9\text{-}231)$$

Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец сварной клетки.

$$\lambda_{\text{кл}} = \frac{2{,}9 D_{\text{кл.ср}}}{z_2 l_2 k^2_{\text{пр}}} \lg \frac{2{,}35 D_{\text{кл.ср}}}{h_{\text{кл}} + l_{\text{кл}}}. \qquad (9\text{-}232)$$

Сопротивление обмотки фазного ротора. Расчет сопротивления обмотки ротора проводят в такой последовательности.

Активное сопротивление обмотки фазы при 20 °С (Ом)	$r_2 = w_2 l_{\text{ср}2}/(\rho_{\text{м}20} S_{\text{ст}} a_2 \cdot 10^3)$	(9-233)
Коэффициент приведения обмотки ротора к обмотке статора	$k_{\text{пр}} = [w_1 k_{\text{об}1}/(w_2 k_{\text{об}2})]^2$	(9-234)
Активное сопротивление обмотки фазы ротора, приведенное к обмотке статора (Ом)	$r'_2 = k_{\text{пр}} r_2$	(9-235)
Активное сопротивление обмотки фазы ротора, приведенное к обмотке статора (о. е.)	r'_{2*} — по (9-203)	
Коэффициенты, учитывающие укорочение шага	k_{β_1} — по (9-181) или (9-183), а k'_{β_1} — по (9-182) или (9-184)	
Коэффициент проводимости рассеяния паза	$\lambda_{\text{п}2} = \frac{h_3}{4b_{\text{п}2}} + \frac{h_1 - h_3}{3b_{\text{п}2}} k_{\beta_1} + \left(\frac{h_2}{b_{\text{п}2}} + \frac{3h_{\text{к}2}}{b_{\text{п}2} + 2b_{\text{ш}2}} + \frac{h_{\text{ш}2}}{b_{\text{ш}2}}\right) k'_{\beta_1}$	(9-236)
Коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов ротора на проводимость дифференциального рассеяния	$k_{\text{ш}2} = (1 - 0{,}033 b^2_{\text{ш}2})/(t_2 \delta)$	(9-237)
Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния	$\lambda_{\text{д}2} \approx 0{,}9 t_2 (q_2 k_{\text{об}2})^2 k_{\text{ш}2} k_{\text{д}2}/(\delta k_\delta)$	(9-238)

Полюсное деление (мм)	$\tau_2=\pi D_{н2}/(2p)$	(9-239)
Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки	$\lambda_{л2}=0,34\frac{q_2}{l_2}(l_{л2}-0,64\beta\tau_2)$	(9-240)
Коэффициент проводимости рассеяния обмотки	$\lambda_2=\lambda_{п2}+\lambda_{д2}+\lambda_{л2}$	(9-241)
Индуктивное сопротивление обмотки фазы ротора (Ом)	$x_2=1,58 f_1 l_2 w^2_2\lambda_2/(pq_2\cdot 10^8)$	(9-242)
Индуктивное приведенное сопротивление обмотки фазы ротора (Ом)	$x'_2=k_{пр}x_2$	(9-243)
Индуктивное приведенное сопротивление обмотки фазы ротора (о. е.)	x'_{2*} — по (9-214)	
Проверка правильности определения x'_2	$x_1/x'_2\approx 0,7\div 1,0$	(9-215)

Здесь h_1, h_2, h_3, $h_{к2}$, $h_{ш2}$, $b_{п2}$, $b_{ш2}$ — размеры частей обмоток и паза, обозначенные на рис. 9-15. Указания по выбору размеров $h_{к2}$, $h_{ш2}$, $b_{ш2}$, $b_{п2}$, $b_{ст}$ приведены в § 9-6; параметры $h_2=1,1$ мм, $h_4=h_3=1,6$ мм (при $U_к\leqslant 750$ В), $h_2=1,7$ мм, $h_4=h_3=2,9$ мм (при $U_к>750$ В); размер обмотки $h_1=h_{п2}-h_{ш2}-h_{к2}-h_2-h_4$; $k_{д2}$ — коэффициент дифференциального рассеяния, определенный по рис. 9-19.

Сопротивления обмоток преобразованной схемы замещения двигателя (с вынесенным на зажимы намагничивающим контуром). Для расчета различных режимов работы асинхронного двигателя удобнее пользоваться схемой замещения двигателя с вынесенным на зажимы намагничивающим контуром. При этом сопротивления обмоток двигателя r_1, x_1, r'_2, x'_2, определенные для Т-образной схемы замещения, должны быть преобразованы путем умножения на некоторые комплексные коэффициенты [28]. Кроме того, активные сопротивления статора и ротора должны быть умножены на коэффициент $m_т$ (см. § 4-1), т. е. приведены к расчетной рабочей температуре, соответствующей классу нагревостойкости примененных изоляционных материалов и обмоточных проводов.

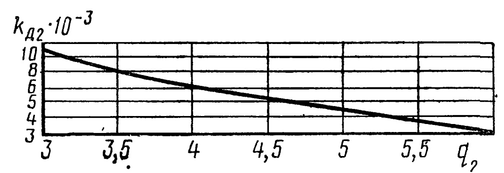


Рис. 9-19. Зависимость $k_{д2}=f(q_2)$ для фазного ротора

Введем следующие понятия: коэффициент рассеяния статора

$$\tau_1=x_1/x_м; \qquad (9\text{-}244)$$

коэффициент сопротивления статора

$$\rho_1=r_1 m_т/(x_1+x_м). \qquad (9\text{-}245)$$

Тогда преобразованные сопротивления обмоток

$$\left.\begin{aligned} &r'_1=m_т r_1; \quad x'_1=x_1(1+\tau_1)(1+r_1\rho_1/x_1);\\ &r''_2=m_т r'_2(1+\tau_1)^2(1+\rho^2_1); \quad x''_2=x'_2(1+\tau_1)^2(1+\rho^2_1). \end{aligned}\right\} \qquad (9\text{-}246)$$

Когда $\rho_1 \leqslant 0{,}1$ (а такие случаи встречаются достаточно часто), можно пользоваться упрощенными формулами

$$\left.\begin{array}{l} r'_1 = m_т r_1; \quad x'_1 = x_1(1+\tau_1); \\ r''_2 = m_т r'_2 (1+\tau_1)^2; \quad x''_2 = x'_2 (1+\tau_1)^2. \end{array}\right\} \qquad (9\text{-}247)$$

Значение коэффициента τ_1 позволяет определить необходимость повторного расчета магнитной цепи; это требуется при коэффициенте насыщения $k_{нас} \geqslant 1{,}7$ и $\tau_1 \geqslant 0{,}05$. Тогда определяют ЭДС х.х. (В)

$$E_0 = U_1/[(1+\tau_1)\sqrt{1+\rho^2_1}]. \qquad (9\text{-}248)$$

Если E_0 из (9-248) отличается от $E = k_н U_1$ из (9-175) более чем на 3%, то повторяют расчет магнитной цепи по (9-116)—(9-177) при магнитных индукциях B_δ, $B_{з1}$, $B_{з2}$, B_{c1} и B_{c2}, измененных пропорционально отношению E_0/E.

Примеры расчета машин

7. Активные и индуктивные сопротивления обмоток

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
211	r_1, Ом	(9-178)	$\frac{126 \cdot 648}{57 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1{,}368 \cdot 10^3} = 0{,}524$	$\frac{68 \cdot 1094}{57 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 5{,}667 \cdot 10^3} = 0{,}0384$
212	r_{1*}, о. е.	(9-179)	$0{,}524 \cdot 15{,}2/220 = 0{,}036$	$0{,}0384 \cdot 171{,}5/380 = 0{,}0173$
213	r_{1*}, о. е.	(9-180)	$\frac{\pi 153\ (239 \cdot 5{,}56)\ 648}{114 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 220 \cdot 15{,}2} = 0{,}036$	$\frac{\pi 422\ (528 \cdot 5{,}04)\ 1094}{114 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 380 \cdot 171{,}5} = 0{,}0173$
214	размеры паза статора, мм	рис. 9-7, § 9-4, табл. 9-21	$b_2 = 7{,}07$; $b_{ш1} = 3{,}5$; $h_{ш1} = 0{,}5$; $h_{к1} = 0{,}7$; $h_2 = 0{,}6$; $h_{п1} = 18{,}5$; $h_1 = 18{,}5 - 0{,}5 - 0{,}7 - 0{,}6 - 0 = 16{,}7$	—
215	$k_{\beta 1}$	(9-181)	1,0	—
216	$k'_{\beta 1}$	(9-182)	1,0	—
217	$\lambda_{п1}$	(9-185)	$\frac{16{,}7}{3 \cdot 7{,}07} 1 + \left(\frac{3 \cdot 0{,}7}{7{,}07 + 2 \cdot 3{,}5} + \frac{0{,}5}{3{,}5} + \frac{0{,}6}{7{,}07}\right) \cdot 1 = 1{,}16$	—
218	размеры паза статора, мм	рис. 9-9, § 9-4, табл. 9-21	—	$b_{п1} = 9{,}5$; $b_{ш1} = 5{,}5$; $h_{ш1} = 1{,}0$; $h_{к1} = 3{,}0$; $h_2 = 1{,}9$; $h_3 = 1{,}0$; $h_{п1} = 38$; $h_1 = 38 - 1 - 3 - 1{,}9 - 1 = 31{,}1$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
219	$k_{\beta 1}$	(9-181)	—	$0{,}4+0{,}6\cdot 0{,}75=0{,}85$
220	$k'_{\beta 1}$	(9-182)	—	$0{,}2+0{,}8\cdot 0{,}75=0{,}8$
221	$\lambda_{п1}$	(9-186)	—	$\frac{1}{4\cdot 9{,}5}+\frac{31{,}1-1}{3\cdot 9{,}5}\,0{,}85+ + \left(\frac{3\cdot 3}{9{,}5+2\cdot 5{,}5}+\frac{1}{5{,}5}+ + \frac{1{,}9}{9{,}5}\right)\cdot 0{,}8=1{,}55$
222	$k_{д1}$	табл. 9-23	$0{,}0141$	$0{,}0062$
223	$k_{ш1}$	(9-188)	$1-\frac{0{,}033\cdot 3{,}5^2}{13{,}3\cdot 0{,}35}=0{,}91$	$1-\frac{0{,}033\cdot 5{,}5^2}{18{,}8\cdot 0{,}9}=0{,}94$
224	$k_{р1}$	табл. 9-2[illegible]	$0{,}91$	—
225	$\lambda_{д1}$	(9-189)	$\frac{0{,}9\,(13{,}3\cdot 0{,}96)^2\times \times 0{,}91\cdot 0{,}91\cdot 0{,}0141}{0{,}35\cdot 1{,}27}=3{,}85$	$\frac{0{,}9\,(18{,}8\cdot 0{,}886)^2\times \times 1\cdot 0{,}94\cdot 0{,}0062}{0{,}9\cdot 1{,}23}=1{,}31$
226	τ, мм	(9-190)	$\pi 153/4=120$	$\pi 422/6=221$
227	$\lambda_{л1}$	(9-191)	$0{,}34\,\frac{3}{115}\,(209-0{,}64\times \times 1\cdot 120)=1{,}17$	$0{,}34\,\frac{4}{225}\,(322-0{,}64\times \times 0{,}75\cdot 220)=1{,}3$
228	λ_1	(9-192)	$1{,}16+3{,}85+1{,}17=6{,}18$	$1{,}55+1{,}31+1{,}3=4{,}16$
229	x_1, Ом	(9-193)	$\frac{1{,}58\cdot 50\cdot 115\cdot 126^2}{2\cdot 3\cdot 10^8}\times \times 6{,}18=1{,}49$	$\frac{1{,}58\cdot 50\cdot 225\,(68)^2}{3\cdot 4\cdot 10^8}\times \times 4{,}16=0{,}285$
230	x_{1*}, о. е.	(9-194)	$1{,}49\cdot 15{,}2/220=0{,}1$	$0{,}285\cdot 171{,}5/380=0{,}13$
231	x_{1*}, о. е.	(9-195)	$\frac{0{,}39\,(153\cdot 239)^2\cdot 115}{3\cdot 220\cdot 15{,}2\cdot 36}\times \times 6{,}18\cdot 10^{-7}=0{,}1$	$\frac{0{,}39\,(422\cdot 528)^2\cdot 225}{3\cdot 380\cdot 177{,}5\cdot 72}\times \times 4{,}16\cdot 10^{-7}=0{,}13$
232	$r_{ст}$, Ом	(9-196)	$115/(27\cdot 95{,}9\cdot 10^3)= =4{,}44\cdot 10^{-5}$	—
233	$k_{пр2}$	(9-198)	$2\pi\cdot 2/34=0{,}37$	—
234	$r_{кл}$, Ом	(9-199)	$\frac{2\pi\cdot 121{,}7}{27\cdot 34\cdot 326\cdot 0{,}37^2\cdot 10^3}= =1{,}87\cdot 10^{-5}$	—
235	$\alpha_{ск}$, рад	(9-200)	$4\cdot 13{,}3/153=0{,}35$	—
236	$k_{ск}$	рис. 9-16	$0{,}996$	—
237	$k_{пр1}$	(9-201)	$\frac{4\cdot 3}{34}\left(\frac{126\cdot 0{,}96}{0{,}996}\right)^2=5206$	—

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
238	r'_2, Ом	(9-202)	$5206\,(4{,}44+1{,}87)\times\times 10^{-5}=0{,}328$	—
239	r'_{2*}, о. е.	(9-203)	$0{,}328\cdot 15{,}2/220=0{,}0227$	—
240	I_2, А	(9-204)	$\frac{2\cdot 126\cdot 0{,}96\cdot 7{,}5\,(0{,}2+0{,}8\cdot 0{,}86)\cdot 10^3}{220\cdot 34\cdot 0{,}87\cdot 0{,}86}=288$	—
241	$\lambda_{п2}$	(9-205)	$\frac{0{,}75}{1{,}5}+\frac{20{,}8+0{,}8\cdot 1}{6\cdot 2{,}9}\times\left(1-\frac{2{,}9^2}{2\cdot 95{,}9}\right)^2+0{,}66-\frac{1{,}5}{4\cdot 2{,}9}=1{,}95$	—
242	q_2	(9-8а)	$34/4\cdot 3=2{,}8$	—
243	$k_{д2}$	рис. 9-17	0,012	—
244	$\lambda_{д2}$	(9-207)	$\frac{0{,}9\cdot 14\,(34/6\cdot 2)^2\cdot 0{,}012}{0{,}35\cdot 1{,}27}=2{,}73$	—
245	$\lambda_{кл}$	(9-208)	$\frac{2{,}9\cdot 121{,}7}{34\cdot 115\cdot 0{,}37^2}\times\lg\frac{2{,}35\cdot 121{,}7}{30{,}6+10{,}65}=0{,}436$	—
246	$\beta_{ск2}$	(9-209)	$1\cdot\frac{13{,}3}{14}=0{,}95$	—
247	$\lambda_{ск}$	(9-210)	$\frac{14{,}0\cdot 95^2}{9{,}5\cdot 0{,}35\;1{,}27\cdot 1{,}43}=2{,}1$	—
248	λ_2	(9-211)	$1{,}95+2{,}73+0{,}436+2=7{,}2$	—
249	x_2, Ом	(9-212)	$7{,}9\cdot 50\cdot 115\cdot 7{,}2\cdot 10^{-9}=0{,}32\cdot 10^{-3}$	—
250	x'_2, Ом	(9-213)	$5206\cdot 0{,}32\cdot 10^{-3}=1{,}67$	—
251	x'_{2*}, о. е.	(9-214)	$1{,}67\cdot 15{,}2/220=0{,}115$	—
252	x_1/x'_2, о. е.	(9-215)	$1{,}48/1{,}67=0{,}886$	—
253	r_2, Ом	(9-233)	—	$27\cdot 1121/(57\cdot 58{,}56\cdot 1\times 10^3)=0{,}009$
254	$k_{пр}$	(9-234)	—	$\left(\frac{68\cdot 0{,}886}{27\cdot 0{,}954}\right)^2=5{,}47$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
255	r'_2, Ом	(9-235)	—	$5,47 \cdot 0,009 = 0,049$
256	r'_{2*}, о. е.	(9-203)	—	$0,049 \cdot 171,5/380 = 0,022$
257	$k_{\beta 2}$	(9-181)	—	$0,4 + 0,6 \cdot 0,962 = 0,977$
258	$k'_{\beta 2}$	(9-182)	—	$0,2 + 0,8 \cdot 0,962 = 0,97$
259	размеры паза ротора, мм	рис. 9-15 табл. 9-21	—	$h_2 = 1,1$ мм; $b_{ш2} = 1,5$ мм; $h_3 = 1,6$ мм; $b_{п2} = 5,18$ мм; $h_{к2} = 3,0$ мм; $h_{ш2} = 1$ мм; $h_1 = 44,3 - 1 - 3,0 - 1,1 - 1,6 = 37,6$
260	$\lambda_{п2}$	(9-236)	—	$\frac{1,6}{4 \cdot 5,18} + \frac{37,6 - 1,6}{3 \cdot 5,18} \times 0,977 + \left(\frac{1,1}{5,18} + \frac{3,3}{5,18 + 2 \cdot 1,5} + \frac{1}{1,5}\right) \times 0,97 = 4,28$
261	$k_{ш2}$	(9-237)	—	$1 - \frac{0,033 \cdot 1,5^2}{16,3 \cdot 0,9} = 0,995$
262	$k_{д2}$	рис. 9-19	—	0,0051
263	$\lambda_{д2}$	(9-238)	—	$\frac{0,9 \cdot 16,3\,(4,5 \times 0,954)^2\, 0,995 \cdot 0,0051}{0,9 \cdot 1,21} = 0,9$
264	τ_2, мм	(9-239)	—	$\pi 420,2/6 = 220$
265	$\lambda_{л2}$	(9-240)	—	$0,34 \frac{4,5}{230} (330,7 - 0,64 \times 0,963 \cdot 220) = 1,3$
266	λ_2	(9-241)	—	$4,28 + 0,9 + 1,3 = 6,48$
267	x_2, Ом	(9-242)	—	$\frac{1,58 \cdot 50 \cdot 230 \cdot 27^2}{3 \cdot 4,5 \cdot 10^8} 6,48 = 0,064$
268	x'_2, Ом	(9-243)	—	$5,47 \cdot 0,064 = 0,35$
269	x'_{2*}, о. е.	(9-214)	—	$0,35 \cdot 171,5/380 = 0,16$
270	x_1/x'_2	(9-215)	—	$0,27/0,35 = 0,77$
271	τ_1	(9-244)	$1,49/38 = 0.04$	$0,285/9,3 = 0,03$
272	ρ_1	(9-245)	$0,524 \cdot 1,22\,(1,49 + 38) = 0,016$	$0,0384 \cdot 1,38/(0,285 + 9,3) = 0,0055$
273	r'_1, Ом	(9-246)	$1,22 \cdot 0,524 = 0,64$	$1,38 \cdot 0,0384 = 0,053$
274	x'_1, Ом	(9-246)	$1,49\,(1 + 0,04) = 1,55$	$0,285\,(1 + 0,03) = 0,294$
275	r''_2, Ом	(9-246)	$1,22 \cdot 0,328\,(1 + 0,04)^2 = 0,43$	$1,38 \cdot 0,049\,(1 + 0,03)^2 = 0,07$
276	x''_2, Ом	(9-246)	$1,67\,(1 + 0,04)^2 = 1,8$	$0,35\,(1 + 0,03)^2 = 0,37$

Примечание. Пересчет магнитной цепи не требуется, так как $k_{нас} < 1,7$, а $\tau_1 < 0,05$.

§ 9-9. Режимы холостого хода и номинальный

Для режима х.х. должны быть определены ток и потери, а также коэффициент мощности.

Магнитные потери в зубцах статора (Вт)

$$P_{з1}=1{,}7p_{1/50}(f_1/50)^{\beta}B^2_{з1ср}m_{з1}. \quad (9\text{-}249)$$

При подстановке в (9-249) значений $p_{1/50}$ и β для разных марок стали при $f_1=50$ Гц можно получить: для стали 2013

$$P_{з1}=4{,}4B^2_{з1ср}m_{з1}; \quad (9\text{-}250)$$

для стали 2312

$$P_{з1}=3{,}0B^2_{з1ср}m_{з1}; \quad (9\text{-}251)$$

для стали 2411

$$P_{з1}=2{,}7B^2_{з1ср}m_{з1}. \quad (9\text{-}252)$$

Если при определении МДС для прямоугольных открытых или полуоткрытых пазов статора $B_{з1max}\leqslant 1{,}8$ Тл, что не потребовало определения $B_{з1ср}$, то следует рассчитать $B_{з1ср}$, пользуясь (9-128) — (9-130) и (9-132).

Магнитные потери в спинке статора (Вт)

$$P_{с1}=1{,}7\,p_{1/50}(f_1/50)^{\beta}B^2_{с1}m_{с1}, \quad (9\text{-}253)$$

где $m_{с1}$ — масса спинки статора.

При подстановке в (9-253) значений $p_{1/50}$ и β для разных марок стали при $f_1=50$ Гц можно получить: для стали 2013

$$P_{с1}=4{,}4B^2_{с1}m_{с1}; \quad (9\text{-}254)$$

для стали 2312

$$P_{с1}=3B^2_{с1}m_{с1}; \quad (9\text{-}255)$$

для стали 2411

$$P_{с1}=2{,}7B^2_{с1}m_{с1}. \quad (9\text{-}256)$$

Если $\rho_1\leqslant 0{,}1$, то при расчете режимов х.х. и номинального, а также при расчете рабочих характеристик можно считать $\rho^2_1\approx 0$.

Расчет режима х.х. проводят в такой последовательности.

Реактивная составляющая тока статора при синхронном вращении (А)	$I_{с.р}=U_1/[x_m(1+\tau_1)(1+\rho^2_1)]$	(9-257)
Электрические потери в обмотке статора при синхронном вращении (Вт)	$P_{с.м1}=m_1I^2_{с.р}r'_1(1+\rho^2_1)$	(9-258)
Расчетная масса стали зубцов статора при трапецеидальных пазах (кг)	$m_{з1}=7{,}8z_1b_{з1}h_{п1}l_1k_с\cdot 10^{-6}$	(9-259)
То же при прямоугольных пазах	$m_{з1}=7{,}8z_1b_{з1ср}h_{п1}l_1k_с\cdot 10^{-6}$	(9-260)
Магнитные потери в зубцах статора (Вт)	$P_{з1}$ — по (9-250), по (9-251) или по (9-252)	
Масса стали спинки статора (кг)	$m_{с1}=7{,}8\pi(D_{н1}-h_{с1})h_{с1}l_1k_с\cdot 10^{-6}$	(9-261)
Магнитные потери в спинке статора (Вт)	$P_{с1}$ — по (9-254), по (9-255) или по (9-256)	
Суммарные магнитные потери в сердечнике статора, включающие добавочные потери в стали (Вт)	$P_{с\Sigma}=P_{з1}\left[1+2\sqrt{\frac{t_1}{10}(k_\delta-1)^2}\right]+P_{с1}$	(9-262)

Механические потери (Вт) при степени защиты и радиальной системе вентиляции; IP23, способе охлаждения IC01: без радиальных вентиляционных каналов	$P_{мх\,\Sigma}=k_{мх}(n_1/1000)^2(D_1/100)^3$; $k_{мх}=5{,}5$ при $2p=2$; $k_{мх}=6{,}5$ при $2p\geqslant4$	(9-263)
с радиальными вентиляционными каналами	$P_{мх\,\Sigma}=(n_к+11)(n_1/1000)^2(D_1/100)^3$	(9-264)
То же, при степени защиты IP44, способе охлаждения IC0141	$P_{мх\,\Sigma}=k_{мх}(n_1/1000)^2(D_{н1}/100)^4$; $k_{мх}=1{,}3(1-D_{н1}/1000)$ при $2p=2$; $k_{мх}=1{,}0$ при $2p\geqslant4$	(9-265)
То же, при степени защиты IP44, способе охлаждения IC0151	$P_{мх\,\Sigma}=(n_к+11)(n_1/1000)^2(D/100)^3+(n_1/1000)^2(0{,}6D_{н1}/100)^4$	(9-266)
Активная составляющая тока х. х. (А)	$I_{оа}=(P_{с.м1}+P_{с\Sigma}+P_{мх})/(m_1U_1)$	(9-267)
Ток х. х. (А)	$I_0=\sqrt{I^2_{оа}+I^2_{с.р}}$	(9-268)
Коэффициент мощности при х. х.	$\cos\varphi_0=I_{оа}/I_0$	(9-269)

Параметры номинального режима работы и рабочие характеристики могут быть получены аналитически и по круговой диаграмме. В последнее время в связи с широким использованием ЭВМ большее применение находят аналитические способы. Предлагаемая методика аналитического расчета разработана проф. *Т. Г. Сорокером* [28, 29]. На рис. 9-20 приведена преобразованная схема замещения асинхронного двигателя с эквивалентным сопротивлением

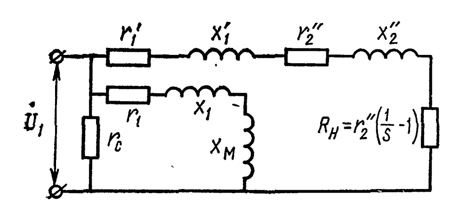


Рис. 9-20. Преобразованная схема замещения асинхронного двигателя с эквивалентным сопротивлением $R_н$

$$R_н=r''_2(1/s-1). \qquad (9\text{-}270)$$

Расчет параметров номинального режима работы проводят в такой последовательности.

Активное сопротивление к. з. (Ом)	$r_к=r'_1+r''_2$	(9-271)
Индуктивное сопротивление к. з. (Ом)	$x_к=x'_1+x''_2$	(9-272)
Полное сопротивление к. з. (Ом)	$z_к=\sqrt{r^2_к+x^2_к}$	(9-273)

Добавочные потери при номинальной нагрузке (Вт) $P_д=0{,}005P_2\cdot 10^3/\eta'$ (9-274)

Механическая мощность двигателя (Вт) $P'_2=P_2\cdot 10^3+P_{мх}+P_д$ (9-275)

Эквивалентное сопротивление схемы замещения (Ом)

$$R_н = m_1U^2{}_1/(2P'_2) - r_к + \sqrt{\left(\frac{m_1U^2{}_1}{2P'_2} - r_к\right)^2 - z^2{}_к} \quad (9\text{-}270а)$$

Полное сопротивление схемы замещения (Ом) $z_н = \sqrt{(R_н + r_к)^2 + x^2{}_к}$ (9-276)

Проверка правильности расчетов $R_н$ и $z_н$ (Ом$^{-1}$) $R_н/z^2{}_н=P'_2/(m_1U^2{}_1)$ (9-277)

Скольжение (о. е.) $S_н=1/(1+R_н/r''_2)$ (9-278)

Активная составляющая тока статора при синхронном вращении (А) $I_{с.а} = (P_{с.м1} + P_{сΣ})/(m_1U_1)$ (9-279)

Ток ротора (А) $I''_2=U_1/z_н$ (9-280)

Ток статора (А):

активная составляющая

$$I_{a1} = I_{са} + I''_2 \left(\frac{R_н + r_к}{z_н}\,\frac{1-\rho^2{}_1}{1+\rho^2{}_1} + \frac{x_к}{z_н}\,\frac{2\rho_1}{1+\rho^2{}_1}\right) \quad (9\text{-}281)$$

реактивная составляющая

$$I_{р1} = I_{о.р} + I''_2 \left(\frac{x_к}{z_н}\cdot\frac{1-\rho^2{}_1}{1+\rho^2{}_1} - \frac{R_н + r'_к}{z_н}\,\frac{2\rho_1}{1+\rho^2{}_1}\right) \quad (9\text{-}282)$$

фазный $I_1 = \sqrt{I^2{}_{a1} + I^2{}_{р1}}$ (9-283)

Коэффициент мощности $\cos\varphi=I_{a1}/I_1$ (9-284)

Линейная нагрузка статора (А/см) $A_1=10I_1N_{п1}/(a_1t_1)$ (9-285)

Плотность тока в обмотке статора (А/мм^2) J_1 — по (9-39)

Линейная нагрузка ротора (А/см) $A_2 = A_1I''_2(1+\tau_1)\sqrt{1+\rho^2{}_1}k_{об1}/(I_1\times k_{об2}k_{ск})$ (9-286)

Для короткозамкнутого ротора $k_{об2}=1$

Ток в стержне короткозамкнутого ротора (А) $I_{ст} = I''_2 2m_1w_1k_{об1}(1+\tau_1)\times\sqrt{1+\rho^2{}_1}/(z_2k_{ск})$ (9-287)

Плотность тока в стержне короткозамкнутого ротора (А/мм^2) $J_{ст}=I_{ст}/S_{ст}$ (9-288)

Ток в короткозамыкающем кольце (А) $I_{кл}=I_{ст}/k_{пр2}$ (9-289)

Ток в верхней части стержня ротора с бутылочными пазами (А) $I_{ст.в}=I_{ст}[1-r'_в/(r'_в+r'_н)]$ (9-290)

То же, в нижней части $I_{ст.н}=I_{ст}[r'_в/(r'_в+r'_н)]$ (9-291)

Ток (фазный) фазного ротора (А) $I_2 = I''_2[w_1k_{об1}(1+\tau_1)\times\sqrt{1+\rho^2{}_1}]/(w_1k_{об2})$ (9-292)

Плотность тока в обмотке фазного ротора (А/мм^2) $J_2=I_2/(c_2S_{ст}a_2)$ (9-293)

Электрические потери в обмотке статора и ротора (Вт) соответственно

$P_{м1}=m_1I^2{}_1r'_1$ (9-294)

$P_{м2}=m_1I_2''^2r''_2$ (9-295)

Суммарные потери в электродвигателе (Вт)	$P_{\Sigma} = P_{м1} + P_{м2} + P_{c\Sigma} + P_{мх} + P_{д}$	(9-296)
Подводимая мощность (Вт)	$P_1 = P_2 \cdot 10^3 + P_{\Sigma}$	(9-297)
Коэффициент полезного действия (%)	$\eta = (1 - P_{\Sigma}/P_1)\ 100$	(9-298)
Подводимая мощность (Вт)	$P_1 = m_1 I_{a1} U_1$	(9-299)
Правильность вычислений (с точностью до округлений) по (9-299) и по (9-297) подтверждается их равенством		
Мощность P_2 по (9-300) должна соответственность заданной в § 9.2	$P_2 = m_1 I_1 U_1 \frac{\eta}{100} \cos\varphi$	(9-300)

Примеры расчета машин

8. Режимы холостого хода и номинальный

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
277	$I_{c.p}$, А	(9-257)	$220/[38,4\ (1+0,04)] = 5,57$	$380/9,3\ (1+0,03) = 39,7$
278	$P_{c.м1}$, Вт	(9-258)	$3 \cdot 5,57^2 \cdot 0,64 = 59,57$	$3 \cdot 39,7^2 \cdot 0,053 = 250,6$
279	$m_{з1}$, кг	(9-259)	$7,8 \cdot 36 \cdot 6,67 \cdot 18,5 \cdot 115 \times 0,97 \cdot 10^{6} = 3,87$	—
280	$P_{з1}$, Вт	(9-250)	$4,4 \cdot 1,85^2 \cdot 3,9 = 58,6$	—
281	t_{1max}, мм	(9-128)	—	$\pi\ (422+2 \cdot 38)/72 = 21,7$
282	$b_{з1\ max}$, мм	(9-129)	—	$21,7 - 9,5 = 12,2$
283	$b_{з1\ ср}$, мм	(9-130)	—	$(9,3+12,2)/2 = 10,75$
284	$B_{з1ср}$, Тл	(9-132)	—	$18,4 \cdot 0,875/(10,75 \times 0,95) = 1,58$
285	$m_{з1}$, кг	(9-260)	—	$7,8 \cdot 72 \cdot 10,75 \cdot 38 \cdot 225 \times 0,95 \cdot 10^{-6} = 49$
286	$P_{з1}$, Вт	(9-251)	—	$3 \cdot 1,58^2 \cdot 49 = 367$
287	m_{c1}, кг	(9-261)	$7,8\pi\ (233-21,4)\ 21,4 \times 115 \cdot 0,97 \cdot 10^{-6} = 12,4$	$7,8\pi\ (590-46)\ 46 \cdot 225 \times 0,95 \cdot 10^{-6} = 131$
288	P_{c1}, Вт	(9-254)	$4,4 \cdot 1,65^2 \cdot 12,4 = 148,5$	—
289	P_{c1}, Вт	(9-255)	—	$3 \cdot 1,55^2 \cdot 131 = 944$
290	$P_{c\Sigma}$, Вт	(9-262)	$58,6\ [1 + 2\sqrt{13,3\,(1,27-1)^2/10}] + 148,5 = 243,6$	$367\ [1 + 2\sqrt{18,4\,(1,23-1)^2/10}] + 944 = 1537$
291	$P_{мх\Sigma}$, Вт	(9-265)	$1 \cdot (1500/1000)^2 \times (233/100)^4 = 66,3$	—
292	$P_{мх\Sigma}$, Вт	(9-263)	—	$6,5\ (1000/1000)^2 \times (422/100)^3 = 488$
293	I_{0a}, А	(9-267)	$\frac{(59,57+243,6+66,3)}{3 \cdot 220} = 0,56$	$\frac{(250,6+1537+488)}{3 \cdot 380} = 2,0$
294	I_0, А	(9-268)	$\sqrt{0,56^2+5,57^2} = 5,6$	$\sqrt{2^2+39,7^2} = 39,75$
295	$\cos\varphi_0$	(9-269)	$0,56/5,6 = 0,1$	$2/39,75 = 0,05$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
296	$r_к$, Ом	(9-271)	$0,64+0,43=1,07$	$0,053+0,07=0,123$
297	$x_к$, Ом	(9-272)	$1,55+1,8=3,35$	$0,294+0,37=0,664$
298	$z_к$, Ом	(9-273)	$\sqrt{1,07^2+3,35^2}=3,52$	$\sqrt{0,123^2+0,664^2}=0,675$
299	$P_д$, Вт	(9-274)	$0,005\cdot 7,5\cdot 10^3/0,87=43$	$0,005\cdot 160\cdot 10^3/0,93=860$
300	P'_2, Вт	(9-275)	$7,5\cdot 10^3+66,3+43==7610$	$160\cdot 10^3+488+860==161\,350$
301	$R_н$, Ом	(9-270а)	$\frac{3\cdot 220^2}{2\cdot 7610}-1,07+\sqrt{\left(\frac{3\cdot 220^2}{2\cdot 7610}-1,07\right)^2-3,52^2}=16,17$	$\frac{3\cdot 380^2}{2\cdot 161\,350}-0,123+\sqrt{\left(\frac{3\cdot 380^2}{2\cdot 161\,350}-0,123\right)^2-0,675^2}=2,24$
302	$z_н$, Ом	(9-276)	$\sqrt{(16,17+1,07)^2+3,35^2}==17,56$	$\sqrt{(2,24+0,123)^2+0,664^2}==2,45$
303	проверка, Ом$^{-1}$	(9-277)	$\frac{16,17}{17,56^2}=0,0524$; $\frac{7610}{3\cdot 220^2}=0,0524$	$\frac{2,24}{2,45^2}=0,373$; $\frac{161\,350}{3\cdot 380^2}=0,373$
304	$s_н$, о. е.	(9-278)	$\frac{1}{1+16,17/0,43}=0,026$	$\frac{1}{1+2,24/0,07}=0,03$
305	$I_{с.а}$, А	(9-279)	$(59,57+243,6)/(3\cdot 220)==0,46$	$(250,6+1537)/(3\cdot 380)==1,57$
306	I''_2, А	(9-280)	$220/17,56=12,5$	$380/2,45=155$
307	$I_{а1}$, А	(9-281)	$0,46+ +12,5\left(\frac{16,17+1,07}{17,56}+\frac{3,35}{17,56}2\cdot 0,016\right)=12,8$	$1,57+ +155\left(\frac{2,24+0,123}{2,45}+\frac{0,664}{2,45}2\cdot 0,0055\right)=151$
308	$I_{р1}$, А	(9-282)	$5,57+12,5\left(\frac{3,35}{17,56}-\frac{16,17-1,07}{17,56}\cdot 2\times 0,016\right)=7,61$	$39,7+155\left(\frac{0,664}{2,45}-\frac{2,24-0,123}{2,45}2\times 0,0055\right)=80,2$
309	I_1, А	(9-283)	$\sqrt{12,8^2+7,61^2}=14,9$	$\sqrt{151^2+80,2^2}=171$
310	$\cos\varphi$	(9-284)	$12,8/14,9=0,86$	$151/171=0,88$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
311	A_1, А/см	(9-285)	$\frac{10\cdot 14,9\cdot 21}{1\cdot 13,3}=235$	$\frac{10\cdot 171\cdot 17}{3\cdot 18,4}=527$
312	J_1, А/мм²	(9-39)	$14,9/(2\cdot 1,368\cdot 1)=5,5$	$171/(2\cdot 5,667\cdot 3)=5,03$
313	A_2, А/см	(9-286)	$235\frac{12,5\cdot(1+0,04)\,0,96}{14,9\cdot 1\cdot 0,996}=$ $=197,6$	$527\frac{155\,(1+0,03)\,0,866}{171\cdot 0,954\cdot 1}=$ $=457$
314	$I_{ст}$, А	(9-287)	$12,5\frac{2\cdot 3\cdot 126\cdot 0,96\cdot 1,04}{34\cdot 0,996}=$ $=279$	—
315	$J_{ст}$, А/мм²	(9-288)	$279/95,9=2,9$	—
316	$I_{кл}$, А	(9-289)	$279/0,37=754$	—
317	I_2, А	(9-292)	—	$155\frac{68\cdot 0,886}{27\cdot 0,954}(1+0,04)=$ $=377$
318	J_2, А/мм²	(9-293)	—	$377/(1\cdot 58,56\cdot 1)=6,44$
319	$P_{м1}$, Вт	(9-294)	$3\cdot 14,9^2\cdot 0,64=426$	$3\cdot 171^2\cdot 0,053=4649$
320	$P_{м2}$, Вт	(9-295)	$3\cdot 12,5^2\cdot 0,43=202$	$3\cdot 155^2\cdot 0,07=5045$
321	P_Σ, Вт	(9-296)	$426+202+243,6+66,4+$ $+43=981$	$4649+5045+1537+488+$ $+860=12\,580$
322	P_1, Вт	(9-297)	$7,5\cdot 10^3+981=8480$	$160\cdot 10^2+12580=172\,600$
323	η, %	(9-298)	$(1-981/8480)\,100=88,4$	$(1-12580/172\,600)\,100=$ $=92,7$
324	Проверка			
	P_1, Вт	(9-299)	$3\cdot 12,8\cdot 220=8450$	$3\cdot 151\cdot 380=172\,140$
	P_2, Вт	(9-300)	$3\cdot 14,9\cdot 220\frac{88,4}{100}0,86=$ $=7500$	$3\cdot 171\cdot 380\frac{92,7}{100}\cdot 0,88=$ $=160\,000$

§ 9-10. Круговая диаграмма и рабочие характеристики

Рабочими характеристиками называют зависимости I_1; η; $\cos\varphi$ и $s=f(P_2)$. Они могут быть рассчитаны аналитически или определены по круговой диаграмме. Даже если рабочие характеристики определяют аналитически, то построение круговой диаграммы желательно, так как она дает наглядное представление об особенностях спроектированного двигателя.

Расчет и построение круговой диаграммы проводят в такой последовательности (рис. 9-21). Выбирают масштаб тока c_I та-

ким, чтобы диаметр рабочего круга диаграммы был в пределах 200—300 мм. Определяют диаметр рабочего круга (мм)

$$D_а = U_1/(c_I x_к). \qquad (9\text{-}301)$$

Определяют масштаб мощности (кВт/мм)

$$c_P = m_1 U_1 c_I \cdot 10^{-3}. \qquad (9\text{-}302)$$

От начала прямоугольных координат (точка O_1) вдоль оси абсцисс откладывают (в масштабе тока): отрезок O_1O_2, равный $I_{с.р}$ (9-257), по оси ординат — отрезок O_1O_3, равный $I_{с.а}$ (9-279). Конец вектора тока, построенного по этим составляющим, дает точку O. Из этой точки проводят прямую, параллельную оси абсцисс. На ней откладывают отрезок $OB = 100$ мм: Из точки B проводят перпендикуляр к оси абсцисс и на нем откладывают отрезки (мм)

$$BC = 2\rho_1 \cdot 100; \quad BE = r'_1 \cdot 100/x_к; \quad BF = r_к \cdot 100/x_к. \qquad (9\text{-}303)$$

Через точки O и C проводят линию, на которой откладывают отрезок OD, равный диаметру рабочего круга $D_а$. На диаметре OD строят окружность круговой диаграммы. Через O и E проводят прямую до пересечения с окружностью в точке G; эта точка соответствует скольжению $s = \infty$. Прямая OG — линия электромагнитных моментов или мощностей. Через точку O и F проводят прямую до пересечения с окружностью в точке K; эта точка соответствует $s = 1$. Прямая OK является линией механических мощностей P'_2. Для построения вспомогательной окружности, облегчающей определение $\cos\varphi$, из точки O_1 радиусом 100 мм проводится четверть окружности. Для определения на круговой диаграмме точки, соответствующей номинальной мощности, следует найти на окружности токов точку A, расстояние от которой до линии механических мощностей по линии AA_1, перпендикулярной диаметру OD, равно P'_2 [по (9-275)] (в масштабе мощности c_P).

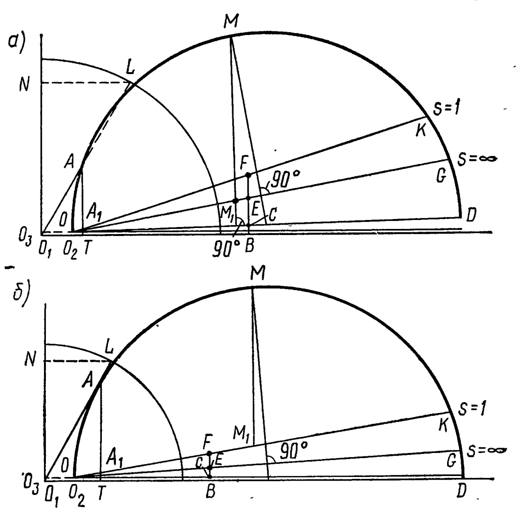


Рис. 9-21. Круговые диаграммы:
а — двигателя № 1; *б* — двигателя № 2

Коэффициент мощности можно определить следующим образом: продлить вектор тока статора (для заданного значения отдаваемой мощности) до пересечения со вспомогательной окруж-

ностью в точке L; из точки L провести линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения оси ординат в точке N; отрезок $O_1N/100$ (мм) дает значение $\cos\varphi$.

Для определения отрезка, соответствующего максимальному моменту (без учета явлений насыщения путей потоков рассеяния и без учета явления вытеснения тока), необходимо выполнить следующие построения. Из центра круговой диаграммы (середина отрезка OD) провести линию, перпендикулярную линии моментов OG, до пересечения с окружностью в точке M. Из этой точки опустить перпендикуляр к линии диаметров до пересечения с линией моментов в точке M_1. Отрезок MM_1 (в масштабе мощности) определяет величину максимального момента.

Рабочие характеристики могут быть рассчитаны и построены также с помощью круговой диаграммы. Покажем определение

Таблица 9-24

Условные обозначения	Источник	Отдаваемая мощность в долях от номинальной P_2				
		$0{,}25P_2$	$0{,}5P_2$	$0{,}75P_2$	P_2	$1{,}25P_2$
Результаты расчета рабочих характеристик двигателя № 1						
P_2, кВт	задание	1,875	3,75	5,625	7,5	9,375
$P_д$, Вт	(9-274)	12	22	33	43	55
P'_2, Вт	(9-275)	1950	3840	5720	7610	9500
$R_н$, Ом	(9-270а)	72	35,3	22,6	16,17	12,1
$z_н$, Ом	(9-276)	73,2	36,6	23,9	17,56	13,6
s, о. е.	(9-278)	0,006	0,012	0,019	0,026	0,035
I''_2, А	(9-280)	3	6	9,2	12,5	16,2
$I_{а1}$, А	(9-281)	3,75	6,5	9,6	12,8	16,3
$I_{р1}$, А	(9-282)	5,6	5,9	6,5	7,61	9,1
I_1, А	(9-283)	6,7	8,7	11,5	14,3	18,7
$\cos\varphi$	(9-284)	0,55	0,74	0,83	0,86	0,87
$P_{м1}$, Вт	(9-294)	85	147	257	426	675
$P_{м2}$, Вт	(9-295)	12	46	120	202	347
P_Σ, Вт	(9-296)	420	525	720	981	1387
P_1, Вт	(9-297)	2295	4275	6345	8480	10760
η, %	(9-298)	81,7	87,7	88,7	88,4	87,1
Результаты расчета рабочих характеристик двигателя № 2						
P_2, кВт	задание	40	80	120	160	200
$P_д$, Вт	(9-274)	215	430	645	860	1075
P'_2, Вт	(9-275)	40 700	80 920	121 100	161 350	201 600
$R_н$, Ом	(9-270а)	10,36	5,02	3,2	2,24	1,64
$z_н$, Ом	(9-276)	10,5	5,18	3,4	2,45	1,88
s, о. е.	(9-278)	0,007	0,014	0,024	0,03	0,047
I''_2, А	(9-280)	36,2	73,4	111,8	155	202
$I_{а1}$, А	(9-281)	37,5	74,3	109,5	151	191,5
$I_{р1}$, А	(9-282)	40,9	47,5	59,2	80,2	106,7
I_1, А	(9-283)	55,5	88,2	124,5	171	219
$\cos\varphi$	(9-284)	0,68	0,84	0,87	0,88	0,86
$P_{м1}$, Вт	(9-294)	490	1 240	2 460	4 649	7 630
$P_{м2}$, Вт	(9-295)	275	1 130	2 625	5 045	8 570
P_Σ, Вт	(9-296)	2780	4 600	7 530	12 580	19 070
P_1, Вт	(2-297)	42 780	84 600	127 500	172 600	219 100
η, %	(9-298)	93,5	94,5	94	92,7	91,3

искомых параметров I_1; $\cos\varphi$; η и s по круговой диаграмме для одной точки рабочей характеристики, соответствующей номинальному значению P_2 и P'_2 (точка A на рис. 9-21). Ток статора I_1 определяется отрезком O_1A, ток ротора I'_2 — отрезком OA, в масштабе тока c_I. Для определения $\cos\varphi$ необходимо продлить вектор тока I_1 (отрезок O_1A) до пересечения с вспомогательной окружностью $\cos\varphi$ в точке L, провести из точки L линию параллельно оси абсцисс до пересечения оси ординат в точке N. Значение отрезка O_1N (мм), деленное на 100, соответствует искомому $\cos\varphi$. Подводимая мощность P_1 равна длине перпендикуляра AT к оси абсцисс (в масштабе мощности c_P). По полученным из круговой диаграммы значениям I_1; I'_2 и P_1 определяют $P_{м1}$; $P_{м2}$; P_Σ и η по формулам (9-294) — (9-298). Скольжение

$$s=P_{м2}/(P'_2+P_{м2}). \qquad (9\text{-}304)$$

Аналогичные расчеты выполняют для других значений мощностей, равных $0{,}25P_2$; $0{,}5P_2$; $0{,}75P_2$; $1{,}25P_2$, определяя вначале на круговой диаграмме точки, соответствующие этим значениям мощностей (аналогично нахождению точки A).

Для аналитического расчета рабочих характеристик можно воспользоваться формулами, применяемыми для определения номинальных значений I_1, η, $\cos\varphi$ и s при номинальном значении P_2. По этим формулам можно рассчитать интересующие нас параметры для пяти значений P_2 ($0{,}25P_2$; $0{,}5P_2$; $0{,}75P_2$; $1{,}0P_2$ и $1{,}25P_2$) и построить рабочие характеристики (в формулы вместо P_2 необходимо подставить соответствующие долевые значения P_2). При расчете $P_д$ по (9-274) условно принимают значение КПД для долевых значений P_2 равным η' при номинальном значении P_2. Результаты расчетов целесообразно свести по форме табл. 9-24.

Примеры расчета машин

9. Круговая диаграмма и рабочие характеристики

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
325	c_1, А/мм	(9-301) § 9-10	220 (200÷300)3,35= =0,328÷0,218 принимаем $c_1=0{,}3$	380/(200÷30)0,664= =2,86÷1,91 принимаем $c_I=2{,}0$
326	$D_а$, мм	(9-301)	220/(0,3·3,35)=219	380/(2·0,664)=286
327	$c_р$, кВт/мм	(9-302)	$3\cdot220\cdot0\text{'}3\cdot10^{-3}=0{,}2$	$3\cdot380\cdot2\cdot10^{-3}=2{,}3$
328	$I_{с.р}$, мм	§ 9-10	5,56/0,3=18,7	39,7/2=19,5
329	$I_{с.а}$, мм	§ 9-10	0,46/0,3=1,5	1,57/2=0,68
330	BC, мм	(9-303)	2·0,016·100=3,2	2·0,0055·100=1; $BC\approx0$
331	BE, мм	(9-303)	0,64·100/3,35=19,1	0,053·100/0,664=8,0
332	BF, мм	(9-303)	1,07·100/3,35=32	0,123·100/0,664=18,5

Примеры построения рабочих характеристик, рассчитанных аналитически, приведены на рис. 9-22. При построении характеристик необходимо иметь в виду, что при $P_2=0$; $I_1=I_0$; $\cos\varphi=\cos\varphi_0$; $\eta=0$; $s=s_0$ (индекс «0» соответствует х.х.).

Круговые диаграммы для двигателей № 1 и № 2 построены на рис. 9-21, *а*, *б*. Расчет рабочих характеристик аналитическим методом сведен в табл. 9-24.

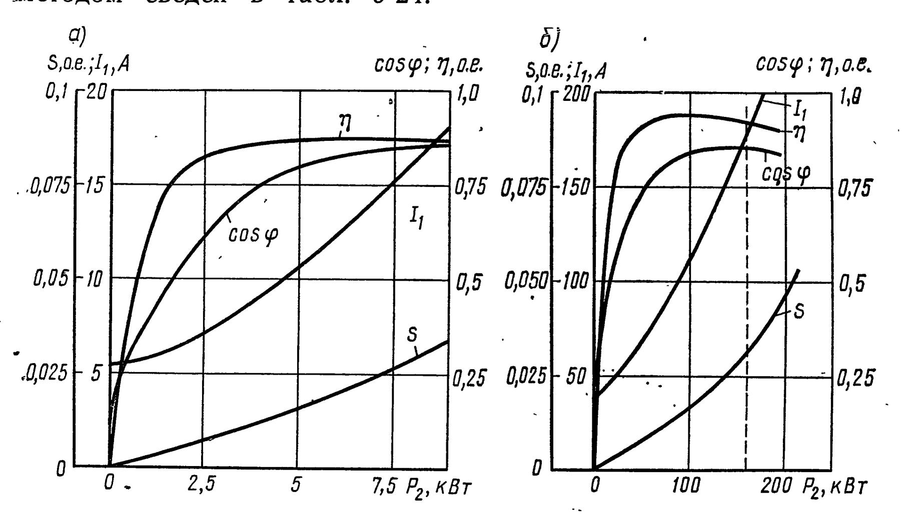


Рис. 9-22. Рабочие характеристики:
а **— двигателя № 1;** ***б*** **— двигателя № 2**

По данным таблицы построены рабочие характеристики двигателя № 1 на рис. 9-22, *а*, двигателя № 2 — на рис. 9-22, *б*.

§ 9-11. Максимальный момент

Максимальный момент асинхронного двигателя должен быть не менее предписанного ГОСТ 19523—74 или 9362—68. При нагрузках, соответствующих моментам, близким к максимальному, токи статора и ротора обычно в два с половиной — три раза больше, чем при номинальной нагрузке. При таких токах наступает насыщение путей потоков рассеяния, вызывающее уменьшение индуктивных сопротивлений статора и ротора и учитываемое при определении максимального момента. Вытеснением тока в обмотке ротора при определении максимального момента можно пренебречь, так как при критическом скольжении частота в роторе невелика.

Для расчета максимального момента можно воспользоваться схемой замещения, приведенной на рис. 9-20, но при этом сопротивление $R_н$ заменить на сопротивление $R_м$, а индуктивные сопротивления определить с учетом насыщения соответствующего нагрузкам при максимальном моменте.

Для учета насыщения путей потоков рассеяния все рассчитанные магнитные проводимости статора и ротора ($\lambda_п$, $\lambda_д$ и $\lambda_л$) подразделяют на две части. К первой относятся все проводимости, зависящие от насыщения, т. е. переменные — часть проводимости пазового рассеяния (рассеяния клиновой части и шлица пазов статора и ротора, мостиков закрытых пазов ротора), проводимости дифференциального рассеяния статора и ротора. Ко второй части — все проводимости, не зависящие от насыщения, т. е. постоянные — оставшаяся часть проводимости пазового рассеяния, проводимости рассеяния лобовых частей обмоток статора и фазного ротора, проводимости рассеяния короткозамыкающих колец и проводимость рассеяния скоса пазов.

Расчет максимального момента проводят в такой последовательности.

Переменная часть коэффициента статора $\lambda_{п1}$ при:		
трапецеидальном полузакрытом пазе	$\lambda_{п1пер} = (3h_{к1}/(b_2 + b_{ш1}) + h_{ш1}/b_{ш1})\, k'_\beta$.	(9-305)
прямоугольном полуоткрытом пазе	$\lambda_{п1пер} = (3h_{к1}/(b_{п1} + 2b_{ш1}) + h_{ш1}/b_{ш1})\, k')$	(9-306)
прямоугольном открытом пазе	$\lambda_{п1пер} = (h_{к1} + h_{ш1})\, k'_\beta/b_{п1}$	(9-307)
Составляющая коэффициента проводимости рассеяния статора, зависящая от насыщения	$\lambda_{1пер}=\lambda_{п1пер}+\lambda_{д1}$	(9-308)
Переменная часть коэффициента ротора $\lambda_{п2}$ при:		
овальном полузакрытом пазе	$\lambda_{п2пер}=h_{ш2}/b_{ш2}$	(9-309)
овальном закрытом пазе	$\lambda_{п2пер}=1{,}12h_2\cdot 10^3/I_2$	(9-310)
бутылочном закрытом пазе	$\lambda_{п2пер}=\lambda_{н.в.пер}=1{,}12h_2\cdot 10^3/I_2$	(9-311)
прямоугольном открытом пазе	$\lambda_{п2пер}=h_{ш2}/b_{п2}$	(9-312)
прямоугольном полузакрытом пазе	$\lambda_{п2пер} = [3h_{к2}/(b_{п2} + 2b_{ш2})+h_{ш2}/b_{ш2}]k'_{\beta 2})$	(9-313)
Составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения	$\lambda_{2пер}=\lambda_{п2пер}+\lambda_{д2}$	(9-314)
Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя (при любой форме пазов статора и ротора, кроме бутылочной), зависящее от насыщения (Ом):	$x_{пер}=x'_1\lambda_{1пер}/\lambda_1+x''_2\lambda_{2\,пер}/\lambda_2$	(9-315)
не зависящее от насыщения	$x_{пост}=x'_1(\lambda_1-\lambda_{1пер})/\lambda_1+x''_2(\lambda_2-\lambda_{2пер})/\lambda_2$	(9-316)
Для бутылочного закрытого паза ротора:		
преобразованное индуктивное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору (Ом)	$x''_0=x'_0(1+\tau_1)^2$	(9-317)
преобразованное индуктивное сопротивление нижней части клетки ротора (Ом)	$x''_н=x'_н(1+\tau_1)^2$	(9-318)
индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения (Ом)	$x_{пер}=x'_1\lambda_{1пер}/\lambda_1+x''_0\lambda_{2пер}/\lambda_{20}$	(9-319)

индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения (Ом)

$$x_{пост}=x'_1\frac{\lambda_1-\lambda_{1пер}}{\lambda_1}+x''_0\frac{\lambda_{20}-\lambda_{2пер}}{\lambda_{20}}+ + x''_н\left(\frac{s_{ст.н}}{s_{ст.в}+s_{ст.н}}\right)^2 \quad (9\text{-}320)$$

Ток ротора, соответствующий максимальному моменту, при любой форме пазов статора, при открытых или полузакрытых пазах ротора (А)

$$I''_{м2}=\frac{U_1}{\sqrt{2\left[(r'^2_1+(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})^2+r'_1(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})\right]}}-\frac{1{,}24\cdot10^3\delta a_1\left[r'_1+2(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})\right]x_{пер}}{2N_{п1}\left[r'^2_1+(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})^2+r'_1(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})\right]} \quad (9\text{-}321)$$

То же, при закрытых овальных или бутылочных пазах ротора

$$I''_{м2}=\frac{U_1}{\sqrt{2\left[r'^2_1+(x_{пост}+0{,}25x_{пер})^2+r'_1(x_{пост}+0{,}25x_{пер})\right]}}-\frac{1{,}24\cdot10^3\delta\alpha_1\left[r'_1+2(x_{пост}+0{,}25x_{пер})\right]x_{пер}}{2N_{п1}\left[r'^2_1+(x_{пост}+0{,}25x_{пер})^2+r'_1(x_{пост}+0{,}25x_{пер})\right]} \quad (9\text{-}322)$$

Полное сопротивление схемы замещения (Ом):

при максимальном моменте $z_м=U_1/I''_{м2}$ (9-323)

при бесконечно большом скольжении ($s>\infty$) $z_\infty=0{,}5\left(\sqrt{r'^2_1+2z^2_м}-r'^2_1\right)$ (9-324)

Эквивалентное сопротивление схемы замещения при максимальном моменте (Ом) $R_м=z_\infty+r'_1$ (9-325)

Кратность максимального момента $\frac{M_{max}}{M_н}=\frac{m_1U^2_1(1-s'_н)}{2R_мP_2\cdot10^3}$ (9-326)

Скольжение при максимальном моменте (о. е.) $s_м=r''_2/z_\infty$ (9-327)

Пример расчета см. стр. 181—182.

§ 9-12. Начальный пусковой ток и начальный пусковой момент

Пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым **ротором** характеризуются значениями начальных пускового тока и момента (ГОСТ 19523—74 или 9362—68). При определении пусковых тока и момента необходимо учитывать два явления, происходящие в двигателях с короткозамкнутым ротором, при пуске — вытеснение тока в пазах короткозамкнутой обмотки ро-

10. Максимальный момент

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
333	$\lambda_{п1пер}$	(9-305)	$\left(\frac{3\cdot 0,7}{7,07+2\cdot 3,5}+\frac{0,5}{3,5}\right)1=0,29$	—
334	$\lambda_{н1пер}$	(9-306)	—	$\left(\frac{3,3}{9,5+2\cdot 5,5}+\frac{1}{5,5}\right)0,8=0,5$
335	$\lambda_{1пер}$	(9-308)	$0,29+3,85=4,14$	$0,5+1,31=1,81$
336	$\lambda_{п2пер}$	(9-309)	$0,75/1,5=0,5$	—
337	$\lambda_{н2пер}$	(9-313)	—	$\left(\frac{3\cdot 3,0}{5,18+2\cdot 1,5}+\frac{1}{1,5}\right)0,97=1,71$
338	$\lambda_{2пер}$	(9-314)	$0,5+2,73=3,23$	$1,71+0,9=2,61$
339	$x_{пер}$, Ом	(9-315)	$1,55\frac{4,14}{6,18}+1,8\frac{3,23}{7,1}=1,86$	$\frac{2,61}{6,48}=0,277$
340	$x_{пост}$, Ом	(9-316)	$1,55\frac{6,18-4,14}{6,18}+1,8\frac{7,1-3,23}{7,1}=1,49$	$0,294\frac{4,16-1,81}{4,16}+0,37\frac{6,48-2,61}{6,48}=0,387$

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
341	$I''_{м2}$, А	(9-321)	$\frac{220}{\sqrt{2[0,64^2+(1,49+0,0825\cdot1,86)^2+ +0,64(1,49+0,0825\cdot1,86)]}} - \frac{1,24\cdot10^3\cdot0,35\cdot1[0,64+2\cdot(1,49+ }{2\cdot21[0,64^2+(1,49+0,0825\cdot1,86)^2+} \rightarrow$ $\rightarrow \frac{+0,0825\cdot1,86)]\cdot1,86}{+0,64\left(1,49+0,0825\cdot1,86\right)]} = 58,24$	$\frac{380}{\sqrt{2[0,053^2+(0,387+0,0825\cdot0,277)^2+ +0,053\cdot(0,387+0,0825\cdot0,277)]}} - \frac{1,24\cdot10^3\cdot0,9\cdot3\cdot[0,053+2(0,387+}{2\cdot17[0,053^2+(0,387+0,0825\cdot0,277)^2+} \rightarrow$ $\rightarrow \frac{+0,0825\cdot0,277)]\cdot0,277}{+0,053\cdot(0,387+0,0825\cdot0,277)]} = 489$
342	$z_м$, Ом	(9-323)	$220/58,24=3,78$	$380/489=0,78$
343	z_∞, Ом	(9-324)	$\frac{\sqrt{0,64^2+2\cdot3,78^2}}{2} - \frac{0,64^2}{2} = 2,5$	$\frac{\sqrt{0,053^2+2\cdot0,78^2}}{2} - \frac{0,53^2}{2} = 0,55$
344	$R_м$, Ом	(9-325)	$2,5+0,64=3,14$	$0,53+0,055=0,585$
345	$M_{max}/M_н$, о. е.	(9-326)	$\frac{3\cdot220^2(1-0,026)}{2\cdot3,14\cdot7,5\cdot10^3} = 3,0$	$\frac{3\cdot380^2(1-0,03)}{2\cdot0,585\cdot160\cdot10^3} = 2,2$
346	$s_м$, о. е.	(9-327)	$0,44/2,5=0,18$	$0,07/0,53=0,13$

тора и насыщение путей потоков рассеяния в зубцах статора и ротора. Вследствие вытеснения тока увеличивается r''_2 и уменьшается x''_2, а в результате насыщения уменьшаются x'_1 и x''_2, поэтому расчет пускового режима следует начинать с определения активных и индуктивных сопротивлений, соответствующих этому режиму. Последовательность расчета такая: определяют r''_2 и x''_2 с учетом вытеснения тока, затем учитывают влияния насыщения на уменьшение x'_1 и x''_2, разделяя индуктивное сопротивление к. з. при пуске на постоянную и переменную части.

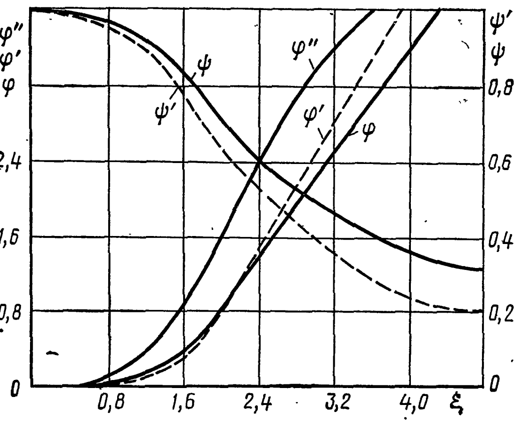


Рис .9-23. Зависимости φ и ψ=f(ξ)

Степень вытеснения тока в стержнях клетки ротора характеризуется приведенной высотой стержня:

$$\xi = 0{,}002 h_{\text{ст}} \sqrt{b_{\text{ст}}/b_{\text{п2}}} \sqrt{27/m_{\text{т}}} \sqrt{s f_1}, \quad (9\text{-}328)$$

где s — скольжение.

Для литой алюминиевой клетки $b_{\text{ст}} = b_{\text{п2}}$, тогда при $f=50$ Гц

$$\xi = 0{,}0735 h_{\text{ст}} \sqrt{s/m_{\text{т}}}, \quad (9\text{-}329)$$

Высота стержня (мм): при полузакрытых пазах

$$h_{\text{ст}} = h_{\text{п2}} - h_{\text{ш2}}; \quad (9\text{-}330)$$

при закрытых пазах

$$h_{\text{ст}} = h_{\text{п2}} - h_2 - h_{\text{ш2}}. \quad (9\text{-}331)$$

Активные и индуктивные сопротивления, соответствующие пусковому режиму, определяют в такой последовательности.

Овальный полузакрытый или закрытый паз ротора

Высота стержня клетки ротора (мм)	$h_{\text{ст}}$ — по (9-330) или по (9-331)	
Приведенная высота стержня ротора	ξ — по (9-329)	
Коэффициент φ	$\varphi = f(\xi)$ — по рис. 9-23	
Расчетная глубина проникновения тока в стержень (мм)	$h_{\text{р}} = h_{\text{ст}}/(1+\varphi)$	(9-332)
Ширина стержня на расчетной глубине проникновения тока (мм): при $r_1 \leqslant h_{\text{р}} \leqslant r_1 + h_1$	$b_{\text{р}} = 2r_1 - \dfrac{2(r_1 - r_2)}{h_1}(h_{\text{р}} - r_1)$	(9-333)
при $h_{\text{р}} < r_1$	$b_{\text{р}} = 2\sqrt{r^2_1 - (r_1 - h_{\text{р}})^2}$	(9-334)
Площадь поперечного сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока (мм²) при $r_1 \leqslant h_{\text{р}} \leqslant$ $\leqslant r_1 + h_1$	$s_{\text{р}} = \dfrac{\pi}{2} r^2_1 + \left(r_1 + \dfrac{b_{\text{р}}}{2}\right)(h_{\text{р}} - r_1)$	(9-335)

при $h_р < r_1$ $s_р = [r_1(\sqrt{b^2_р + 5{,}33h^2_р} - b_р) + b_р h_р]/2$ (9-336)

Коэффициент вытеснения тока $k_{в.т} = s_{ст}/s_р$ (9-337)

Активное сопротивление стержня клетки при 20 °С для пускового режима (Ом) $r_{ст.п} = r_{ст} k_{в.т}$ (9-338)

Активное сопротивление обмотки ротора при 20 °С, приведенное к обмотке статора (для пускового режима) (Ом) $r'_{2п} = k_{пр1}(r_{ст.п} + r_{кл})$ (9-339)

Коэффициент ψ $\psi = f(\xi)$ — по рис. 9-23

Коэффициент проводимости рассеяния паза ротора (при пуске): для овального полузакрытого паза

$$\lambda_{п2п} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} + \left[\frac{h_1 + 0{,}8r_2}{6r_1}\left(1 - \frac{\pi r^2_1}{2s_{ст}}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_{ш2}}{4r_1}\right]\psi \quad (9\text{-}340)$$

для овального закрытого паза

$$\lambda_{п2п} = 1{,}12\,\frac{h_2 \cdot 10^3}{I_2} + 0{,}3 + \left[\frac{h_1 + 0{,}8r_2}{6r_1} \times \left(1 - \frac{\pi r^2_1}{2s_{ст}}\right)^2 + 0{,}66 - b_{ш2}/4r_1\right]\psi \quad (9\text{-}341)$$

Коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора при пуске $\lambda_{2п} = \lambda_{п2п} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск}$ (9-342)

Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее и не зависящее от насыщения (Ом)

$$x_{пер} = x'_1\frac{\lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x''_2\frac{\lambda_{2пер}}{\lambda_{2п}} \quad (9\text{-}343)$$

$$x_{пост} = x'_1\frac{\lambda_1 - \lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x''_2\frac{\lambda_{2п} - \lambda_{2пер}}{\lambda_{2п}} \quad (9\text{-}344)$$

Активное сопротивление к. з. при пуске (Ом) $r_{к.п} = r'_1 + r'_{2п} m_т (1 + \tau_1)^2 (1 + \rho_1)^2$ (9-345)

Прямоугольный открытый паз ротора и сварная алюминиевая клетка. Сопротивления обмоток определяют как для ротора с овальными пазами со следующими изменениями.

Коэффициент вытеснения тока

$$k_{в.т} = 1 + \varphi(l_2 - n_к l_к)/l_2. \quad (9\text{-}346)$$

Коэффициент проводимости рассеяния прямоугольного открытого паза ротора

$$\lambda_{п2п} = \psi(h_{п2} - h_{ш2})/(3b_{п2}) + h_{ш2}/b_{п2}. \quad (9\text{-}347)$$

Для определения коэффициента ξ в (9-328) следует подставить $b_{ст}/b_{п2} = 0{,}9$ и $\gamma_{ал} = 30$ См/мкм (вместо $\gamma_{ал} = 27$ См/мкм), при этом числовой коэффициент получается равным 0,735, что позволяет пользоваться формулой (9-329).

Бутылочный закрытый паз ротора

Высота стержня (мм)	$h_{ст}=h_{п2}-h_2$	(9-348)
Приведенная высота стержня ротора	ξ — по (9-329)	
Коэффициенты	φ и ψ — по рис. 9-23	
Расчетная глубина проникновения тока в нижнюю часть стержня (мм)	$h_{р.н}=h_{ст}(1+\varphi)-h$	(9-349)
Ширина нижней части стержня на расчетной глубине проникновения тока (мм) при $r_1\leqslant h_{р.н}\leqslant r_1+h_1$	$b_{р.н}=2r_1-\frac{2(r_1+r_2)}{h_1}(h_{р.н}-r_1)$	(9-350)
при $h_{р.н}<r_1$	$b_{р.н}=2\sqrt{r^2{}_1-(r_1-h_р)^2}$	(9-351)
Площадь поперечного сечения нижней части стержня при расчетной глубине проникновения тока (мм^2) при $r_1\leqslant h_{р.н}\leqslant r_1+h_1$	$s_{р.н2}=\frac{\pi}{2}r^2{}_1+\left(r_1+\frac{b_{р.н}}{2}\right)(h_{р.н}-r_1)$	(9-352)
при $h_{р.н}<r_1$	$s_{р.н}=\frac{r_1\left(\sqrt{b^2{}_{р.н}+5{,}33h^2{}_{р.н}}-b_{р.н}+b_{р.н}h_{р.н}\right)}{2}$	(9-353)
Коэффициент вытеснения тока в нижней части стержня	$k_{в.т.н}=s_{ст.н}/s_{р.н}$	(9-354)
Активное сопротивление нижней части стержня, приведенное к статору (Ом)	$r'_{ст.н.п}=r'_{ст.н}k_{в.т.н}$	(9-355)
Активное результирующее сопротивление при 20 °C (Ом)	$r'_{2п}=r'_0+r'_{ст.в}r'_{ст.н.п}/(r'_{ст.в}+r'_{ст.н.п})$	(9-356)
Коэффициент	$\psi''=[(h_{п2}-h_2)\psi-h]/(h_{п2}-h_2-h)$	(9-357)
Коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки	$\lambda_{2н.п}=\left[\frac{h_1+0{,}8r_2}{6r_1}\left(1-\frac{\pi r^2{}_1}{2s_{ст.н}}\right)^2+0{,}66-b/(4r_1)\right]\psi''+(h+0{,}18)/(2b)$	(9-358)
Приведенный коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки	$\lambda'_{2н.п}=\lambda_{2н.п}l_2z_1k^2{}_{об}/(l_1z_2)$	(9-359)
Индуктивное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору (Ом)	$x'_{н.п}=x_1\lambda'_{2н.п}/\lambda_1$	(9-360)
Расчетная глубина проникновения тока в нижний стержень (для расчета x) (мм)	$h_{xн}=(h_{п2}-h_2)\psi-h$	(9-361)
Ширина нижнего стержня на расчетной глубине проникновения тока (для расчета x) (мм) при $r_1\leqslant h_{xн}\leqslant r_1+h_1$	$b_{xн}=2r_1-\frac{2(r_1-r_2)}{h_1}(h_{xн}-r_1)$	(9-362)
при $h_{xн}<r_1$	$b_{xн}=2\sqrt{r^2{}_1-(r_1-h_{xн})^2}$	(9-363)
Площадь поперечного сечения нижнего стержня при расчетной глубине проникновения тока (мм^2) при $r_1\leqslant h_{xн}\leqslant r_1+h$	$s_{xн}=\frac{\pi}{2}r^2{}_1+\left(r_1+\frac{b_{xн}}{2}\right)(h_{xн}-r_1)$	(9-364)
при $h_{xн}<r_1$	$s_{xн}=r_1\left(\sqrt{b^2{}_{xн}+5{,}33h^2{}_{xн}}-b_{xн}h_{xн}\right)/2$	(9-365)
Составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения	$\lambda_{2пер}$ — по (9-314)	

Преобразованное индуктивное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору (Ом) — x''_0 — по (9-317)

Преобразованное индуктивное сопротивление нижней части клетки ротора (Ом) — $x''_{н.п}=x'_{н.п}(1+\tau_1)^2$ (9-366)

Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения (Ом) — $x_{пер}$ — по (9-319)

Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения (Ом)

$$x_{пост}=x'_1\frac{\lambda_1-\lambda_{1пер}}{\lambda_1}+x''_0\frac{\lambda_{20}-\lambda_{2пер}}{\lambda_{20}}+x''_{н.п}\left(\frac{s_{xн}}{s_{xн}+s_{ст.в}}\right)^2 \quad (9\text{-}367)$$

Активное сопротивление к. з. при пуске (Ом) — $r_{к.п}$ — по (9-345)

Начальные пусковые ток и момент определяют в такой последовательности

Ток ротора при пуске для двигателей с открытыми и полузакрытыми пазами короткозамкнутого ротора и с любой формой пазов статора (А)

$$I''_{п2}=\frac{U_1}{\sqrt{r^2_{к.п}+(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})^2}}-\frac{1{,}24\cdot10^3\delta a_1x_{пер}(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})}{N_{п1}[r^2_{к.п}+(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})^2]} \quad (9\text{-}368)$$

То же, для двигателей с закрытыми пазами ротора

$$I''_{п2}=\frac{U_1}{\sqrt{r^2_{к.п}+(x_{пост}+0{,}25x_{пер})^2}}-\frac{1{,}24\cdot10^3\delta a_1x_{пер}(x_{пост}+0{,}25x_{пер})}{N_{п1}[r^2_{к.п}+(x_{пост}+0{,}25x_{пер})^2]}, \quad (9\text{-}369)$$

Полное сопротивление схемы замещения при пуске (с учетом явлений вытеснения тока и насыщения путей потоков рассеяния) (Ом) — $z_{к.п}=U_1/I''_{п2}$ (9-370)

Индуктивное сопротивление схемы замещения при пуске (Ом)

$$x_{к.п}=\sqrt{z^2_{к.п}-r^2_{к.п}} \quad (9\text{-}371)$$

Активная и реактивная составляющие тока статора при пуске (А)

$$I_{п.а1}=I_{с.а}+I''_{п2}\left(\frac{r_{к.п}}{z_{к.п}}\frac{1-\rho^2_1}{1+\rho^2_1}+\frac{x_{к.п}}{z_{к.п}}\frac{2\rho_1}{1+\rho^2_1}\right) \quad (9\text{-}372)$$

$$I_{п.р1}=I_{с.р}+I''_{п2}\left(\frac{x_{к.п}}{z_{к.п}}\frac{1-\rho^2_1}{1+\rho^2_1}-\frac{r_{к.п}}{z_{к.п}}\frac{2\rho_1}{1+\rho^2_1}\right) \quad (9\text{-}373)$$

Фазный ток статора при пуске (А) — $I_{п1}=\sqrt{I^2_{п.а1}+I^2_{п.р1}}$ (9-374)

Кратность начального пускового тока — $I_{п1}/I_1$ (9-375)

Активное сопротивление ротора при пуске, приведенное к статору, при расчетной рабочей температуре и Г-образной схеме замещения (Ом) — $r''_{2п}=r'_{2п}m_т(1+\tau_1)^2(1+\rho^2_1)$ (9-376)

Кратность начального пускового момента

$$\frac{M_п}{M_н}=m_1I''^2_{п2}r''_{2п}(1-s_н)/(P_2\cdot10)^3 \quad (9\text{-}377)$$

11. Начальный пусковой ток и начальный пусковой момент

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1
347	$h_{ст}$, мм	(9-330)	$25,5-0,75=24,75$
348	ξ	(9-329)	$0,0735\cdot24,75\sqrt{1/1,22}=1,65$
349	φ	рис. 9-23	0,4
350	$h_{р}$, мм	(9-332)	$24,75/(1+0,4)=17,7$
351	$b_{р}$, мм	(9-333)	$2\cdot2,9-\frac{2(2,9-1)}{20,8}(17,7-2,9)=3,1$
352	$s_{р}$, мм²	(9-335)	$\frac{\pi}{2}2,9^2+(2,9+3,1/2)(17,7-2,9)=79,06$
353	$k_{в.т}$	(9-337)	$95,9/79,06=1,21$
354	$r_{ст.п}$, Ом	(9-338)	$4,44\cdot10^{-5}\cdot1,21=5,33\cdot10^{-5}$
355	$r'_{2п}$, Ом	(9-339)	$5206(5,33+1,85)\cdot10^{-5}=0,374$
356	ψ	рис. 9-23	0,82
357	$\lambda_{п2п}$	(9-340)	$\frac{0,75}{1,5}+\left[\frac{20,8+0,8\cdot1}{6\cdot2,9}\left(1-\frac{2,9^2}{2\cdot95,9}\right)^2+0,66-\frac{1,5}{4\cdot2,9}\right]0,82=1,69$
358	$\lambda_{2п}$	(9-342)	$1,69+2,73+0,436+2,1=6,87$
359	$x_{пер}$, Ом	(9-343)	$1,55\frac{4,14}{6,18}+1,8\frac{3,23}{6,87}=1,88$
360	$x_{пост}$, Ом	(9-344)	$1,55\frac{6,18-4,14}{6,18}+1,8\frac{6,87-3,23}{6,87}=1,47$
361	$r_{к.п}$, Ом	(9-345)	$0,64+0,374\cdot1,22(1+0,04)^2=1,14$
362	$I''_{п2}$, А	(9-368)	$220/\sqrt{1,14^2+(1,47+0,0825\cdot1,88)^2-}$ $-\frac{1,24\cdot10^3\cdot0,35\cdot1\cdot1,88(1,47+0,0825\cdot1,88)}{21[1,14^2+(1,47+0,0825\cdot1,88)^2]}=$ $=95,2$
363	$z_{к.п}$, Ом	(9-370)	$220/95,2=2,3$
364	$x_{к.п}$, Ом	(9-371)	$\sqrt{2,3^2-1,14^2}=2,0$
365	$I_{п.а1}$, А	(9-372)	$0,46+95,2\left(\frac{1,14}{2,3}+\frac{2,0}{2,3}2\cdot0,016\right)=50,3$
366	$I_{п.р1}$, А	(9-373)	$5,57+95,2\left(\frac{2}{2,3}-\frac{1,14}{2,3}2\cdot0,016\right)=86,9$
367	$I_{п1}$, А	(9-374)	$\sqrt{50,3^3+86,9^2}=100,4$
368	$I_{п1}/I_1$, о. е.	(9-375)	$100,4/14,9=6,7$
369	$r''_{2п}$, Ом	(9-376)	$0,374\cdot1,22\cdot1,04^2=0,49$
370	$M_п/M_н$	(9-377)	$\frac{3\cdot95,2^2\cdot0,49(1-0,026)}{7,5\cdot10^3}=1,7$

§ 9-13. Тепловой и вентиляционный расчеты

Тепловой расчет асинхронного двигателя. Проводим его по упрощенной методике, изложенной в § 5-3.

При выполнении теплового расчета необходимо учитывать следующее. 1. Потери в обмотках вычисляют при сопротивлениях, приведенных к максимальной допускаемой температуре; для этого сопротивление, определенное при 20° С, умножают на коэффициент $m'_т$ (см. § 5-1) в соответствии с выбранным классом нагревостойкости изоляции.

Таблица 9-25

Количество полюсов $2p$	Коэффициент k для двигателей со степенью защиты	
	IP44	IP23
2; 4	0,20—0,22	0,80—0,84
6; 8	0,18—0,19	0,76—0,78
10; 12	0,16—0,17	0,72—0,74

2. При тепловом расчете обмотки статора учитывают, что воздуху внутри двигателя передается только часть потерь в активной части статора (эта доля потерь равна коэффициенту k из табл. 9-25); остальные потери передаются непосредственно через станину наружному охлаждающему воздуху.

3. Для обмоток, не имеющих изоляцию катушек в лобовых частях, первое слагаемое в (9-394), а также $\Delta t_{и.л1}$ в (9-395) необходимо считать равными нулю.

4. При определении по (9-400) среднего превышения температуры воздуха внутри машины $\Delta t_в$ у асинхронных двигателей со степенью защиты IP23 принимают, что воздух внутри двигателя нагревается всеми выделяемыми потерями (за исключением части потерь в статоре, передаваемых через станину), а у двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141, кроме того, за исключением потерь на трение о воздух наружного вентилятора, составляющие примерно 0,9 $P_{мх\Sigma}$.

Обмотка статора. Тепловой расчет для определения превышения температуры обмотки статора проводят в такой последовательности.

Потери в обмотке статора при максимальной допускаемой температуре (Вт) $$P'_{м1}=m_1 I^2_1 m'_т r'_1 \quad (9\text{-}378)$$

Условная внутренняя поверхность охлаждения активной части статора (мм²) $$S_{п1}=\pi D_1 l_1 \quad (9\text{-}379)$$

Условный периметр поперечного сечения (мм): трапецеидального полузакрытого паза $$П_1=2h_{п1}+b_1+b_2 \quad (9\text{-}380)$$

прямоугольного полуоткрытого и открытого пазов $$П_1=2(h_{п1}+b_{п1}) \quad (9\text{-}381)$$

Условная поверхность охлаждения (мм²): пазов $$S_{и.п1}=z_1 П_1 l_1 \quad (9\text{-}382)$$

лобовых частей обмотки $$S_{л1}=4\pi D_1 l_{в1} \quad (9\text{-}383)$$

двигателей без охлаждающих ребер на станине

$$S_{маш} = \pi D_{н1}(l_1 + 2l_{в1}) \qquad (9\text{-}384)$$

двигателей с охлаждающими ребрами на станине

$$S_{маш.р} = (\pi D_{н1} + 8n_р h_р)(l_1 + 2l_{в1}) \qquad (9\text{-}385)$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки и от потерь в стали, отнесенных к внутренней поверхности охлаждения активной части статора (Вт/мм²)

$$p_{п1} = k(P'_{м1} 2l_1/l_{ср1} + P_{c\Sigma})/S_{п1} \qquad (9\text{-}386)$$

То же, от потерь в активной части обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения пазов

$$p_{и.п1} = (P'_{м1} 2l_1/l_{ср1})/S_{и.п1} \qquad (9\text{-}387)$$

То же, от потерь в лобовых частях обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки

$$p_{л1} = (P'_{м1} 2l_{л1}/l_{ср1})/S_{л1} \qquad (9\text{-}388)$$

Окружная скорость ротора (м/с)

$$v_2 = \pi D_{н2} n_1/60\,000 \qquad (9\text{-}389)$$

Превышение температуры внутренней поверхности активной части статора над температурой воздуха внутри машины (°С)

$$\Delta t_{п1} = P_{п1}/\alpha_1 \qquad (9\text{-}390)$$

Перепад температуры в изоляции паза и катушек из круглых проводов (°С)

$$\Delta t_{и.п1} = P_{и.п1}[b_{и1}/\lambda_{экв} + (b_1 + b_2)/(16\lambda'_{экв})] \qquad (9\text{-}391)$$

То же в изоляции паза и жестких катушек или полукатушек

$$\Delta t_{и.п1} = P_{и.п1} b_{и1}/\lambda_{экв} \qquad (9\text{-}392)$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри двигателя (°С)

$$\Delta t_{л1} = P_{л1}/\alpha_1 \qquad (9\text{-}393)$$

Перепад температуры в изоляции лобовых частей катушек из круглых проводов (°С)

$$\Delta t_{и.л1} = P_{л1}[b_{и.л1}/\lambda_{экв} + h_{п1}/(12\lambda'_{экв})] \qquad (9\text{-}394)$$

То же, из жестких катушек или полукатушек

$$\Delta t_{и.л1} = P_{л1}(b_{и.л1}/\lambda_{экв}) \qquad (9\text{-}395)$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри двигателя (°С)

$$\Delta t'_1 = (\Delta t_{п1} + \Delta t_{и.п1})\frac{2l_1}{l_{ср1}} + (\Delta t_{л1} + \Delta t_{и.л1})\frac{2l_{л1}}{l_{ср1}}. \qquad (9\text{-}396)$$

Потери в двигателе со степенью защиты IP23, передаваемые воздуху внутри двигателя, (Вт)

$$P'_\Sigma = k\left(P'_{м1}\frac{2l_1}{l_{ср1}} + P_{c\Sigma}\right) + P'_{м1}\frac{2l_{л1}}{l_{ср1}} + P'_{м2} + P_{мх\Sigma} + P_д \qquad (9\text{-}397)$$

То же, для IP44

$$P'_{\Sigma}=k\left(P'_{\text{м1}}\frac{2l_1}{l_{\text{ср1}}}+P_{\text{c}\Sigma}\right)+$$
$$+P'_{\text{м1}}\frac{2l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}}+P'_{\text{м2}}+0{,}1P_{\text{мх}\Sigma}+P_{\text{д}} \qquad (9\text{-}398)$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой наружного воздуха без охлаждающих ребер на станине или с ребрами (°С)

$$\left.\begin{aligned}\Delta t_{\text{в}}&=P'_{\Sigma}/(S_{\text{маш}}\alpha_{\text{в}});\\ \Delta t_{\text{в}}&=P'_{\Sigma}/(S_{\text{маш.р}}\alpha_{\text{в}})\end{aligned}\right\} \qquad (9\text{-}399)$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного воздуха (°С)

$$\Delta t_1=\Delta t'_1+\Delta t_{\text{в}} \qquad (9\text{-}400)$$

Здесь $n_{\text{р}}$ и $h_{\text{р}}$ — количество и высота охлаждающих ребер станины по данным § 3-10; k — из табл. 9-25; α_1 — коэффициент теплоотдачи поверхности статора определяют из рис. 9-24; $\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент подогрева воздуха — находят по рис. 9-25; $b_{\text{и1}}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу статора (при

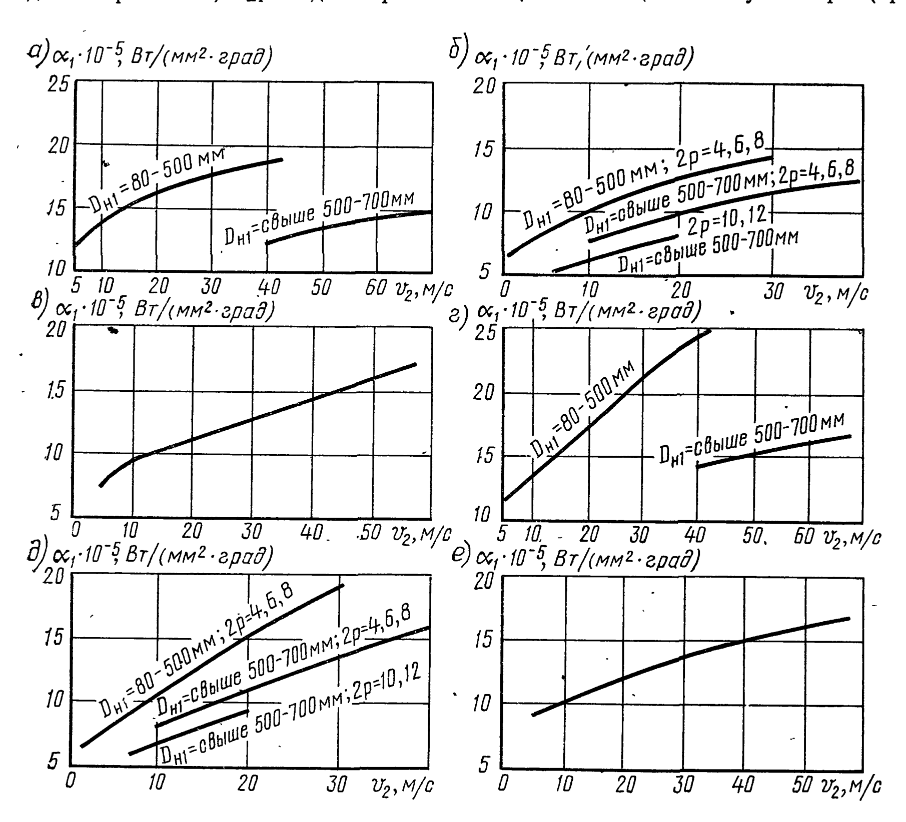


Рис. 9-24. Средние значения $\alpha_1=f(v_2)$:

а — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141, $U\leqslant660$ В, $2p=2$; *б* — то же, что *а*, но $2p=4$, 6, 8, 10, 12; *в* — IP44, IC0151, $U=6000$ В, $2p=4$, 6, 8, 10, 12; *г* — IP23, IC01, $U\leqslant660$ В, $2p=2$; *д* — то же, что и *г*, но $2p=4$, 6, 8, 10, 12; *е* — IP23, IC01, $U=6000$ В, $2p=4$, 6, 8, 10, 12

Рис. 9-25. Средние значения $\alpha_в = f(v_2)$:

а — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141, $U \leqslant 660$ В, $2p=2$; *б* — то же, что *а*, но $2p=4$, 6, 8, 10, 12; *в* — IP44, IC0151, $U=6000$ В, $2p=4$, 6, 8, 10, 12; *г* — IP23, IC01, $U \leqslant 660$ В, $2p=2$; *д* — то же, что *г*, но $2p=4$, 6, 8, 10, 12; *е* — IP23, IC01, $U=6000$ В, $2p=4$, 6, 8, 10, 12

полуоткрытых и открытых пазах $b_{и1}=(b_{п1}-N_ш b)/2$, при полузакрытых $b_{и1}$ в § 9-4; $b_{и л1}$ — односторонняя толщина изоляции катушек в лобовой части (см. приложения 27—30); $\lambda_{экв}=16\cdot10^{-5}$ Вт/(мм·град) — эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции в пазу, включающий воздушные прослойки; $\lambda'_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности внутренней изоляции катушки, зависящий от отношения диаметров изолированного и неизолированного провода d/d' (рис. 9-26).

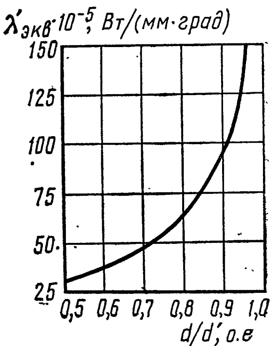


Рис. 9-26. Средние значения $\lambda'_{экв}=f(d/d')$

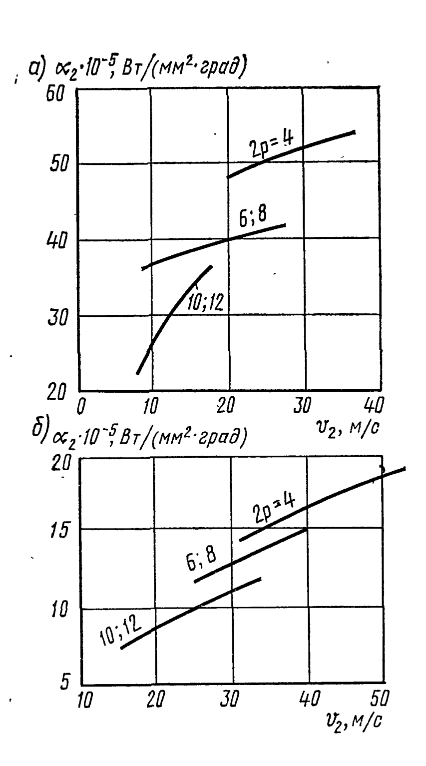
Обмотка фазного ротора. Тепловой расчет для определения превышения температуры фазного ротора проводят в такой последовательности.

Потери в обмотке ротора при максимальной допускаемой температуре (Вт)	$P'_{м2}=m_1(I''_2)^2m'_т r''_2$	(9-401)
Условная наружная поверхность охлаждения активной части ротора (мм²)	$S_{п2}=\pi D_{н2}l_2$	(9-402)
Условный периметр поперечного сечения полуоткрытого паза (мм)	$П_2=2(h_{п2}+b_{п2})$	(9-403)
Условная поверхность охлаждения пазов и лобовых частей обмотки, (мм²)	$S_{и.п2}=z_2П_2l_2$	(9-404)
	$S_{л2}=4\pi D_{н2}l_{в2}$	(9-405)
Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки ротора отнесенных к наружной поверхности охлаждения активной части ротора (Вт/мм²)	$p_{п2}=P'_{м2}(2l_2/l_{ср2})/S_{п2}$	(9-406)
То же, отнесенных к поверхности охлаждения пазов	$p_{и.п2}=P'_{м2}(2l_2/l_{ср2})/S_{и.п2}$	(9-407)
То же, от потерь в лобовых частях обмотки ротора, отнесенных к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки	$p_{л2}=P'_{м2}(2l_{л2}/l_{ср2})/S_{л2}$	(9-408)
Превышение температуры наружной поверхности активной части ротора над температурой воздуха внутри машины (°С)	$\Delta t_{п2}=p_{п2}/\alpha_2$	(9-409)
Перепад температуры в изоляции проводов и пазов (°С)	$\Delta t_{и.п2}=p_{и.п2}b_{и2}/\lambda_{экв}$	(9-410)
Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри двигателя (°С)	$\Delta t_{л2}=p_{л2}/\alpha_2$	(9-411)
Перепад температуры в изоляции проводов и катушек лобовых частей обмотки (°С)	$\Delta t_{и.л2}=p_{л2}b_{и.л2}/\lambda_{экв}$	(9-412)
Среднее превышение температуры обмотки: над температурой воздуха внутри двигателя	$\Delta t'_2=(\Delta t_{п2}+\Delta t_{и.п2})2l_2/l_{ср2}+(\Delta t_{л2}+\Delta t_{и.л2})2l_{л2}/l_{ср2}$	(9-413)
над температурой наружного воздуха соответственно (°С)	$\Delta t_2=\Delta t'_2+\Delta t_в$	(9-414)

Здесь α_2 — коэффициент теплоотдачи поверхности ротора (рис. 9-27); $b_{и2}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу ротора (§ 9-4); $b_{и.л2}$ — односторонняя толщина изоляции катушек в лобовой части (см. приложение 22).

Вентиляционный расчет асинхронных двигателей с радиальной вентиляцией. Рассчитывают двигатели со степенью защиты IP23 и со способом охлаждения IC01, а также двигатели со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 в соответствии с изложенным в § 5-6. Расход воздуха $V'_в$, обеспечиваемый вентиляционным устройством, должен быть не менее необходимого расхода воздуха $V_в$. При этом следует учитывать, что эмпирические формулы для расчета $V'_в$ и H двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 действительны лишь при условии реализации в конструкции машины рекомендаций гл. 3 в части диаметра наружного вентилятора, длины и количества его лопаток.

Вентиляционный расчет двигателей проводят в такой последовательности.



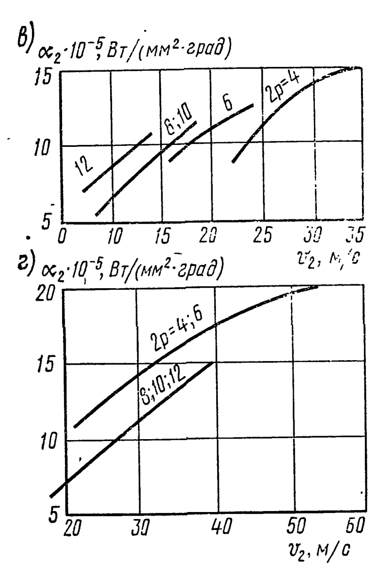


Рис. 9-27. Средние значения $\alpha_2 = f(v_2)$
а — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141, $D_{н1}$=380÷660 мм, $U \leqslant 660$ В; *б* — IP44, IC0141, $D_{н1}$=661÷990 мм, U=6000 В; *в* — IP23, IC01, $D_{н1}$=380÷660 В; $U \leqslant 660$ В; *г* — IP23, IC01, $D_{н1}$=661÷990 мм, U=6000 В

Двигатели со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01 (радиальная система вентиляции)

Необходимый расход воздуха (м³/с)	$V_в$ — по (5-28)
Коэффициент, зависящий от частоты вращения n_1	K_1 — по (5-40)
Расход воздуха, который может быть обеспечен радиальной вентиляцией (м³/с)	$V'_в$ — по (5-39)
Напор воздуха, развиваемый при радиальной вентиляции (Па)	H — по (5-41)

Двигатели со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141

Наружный диаметр корпуса (мм)	$D_{корп}$ — по (1-27) и рис. 1-3
Коэффициент, учитывающий изменение теплоотдачи по длине корпуса двигателя	K_2 — по (5-43)
Необходимый расход воздуха (м³/с)	$V_в$ — по (5-42)
Расход воздуха, который может быть обеспечен наружным вентилятором (м³/с)	$V'_в$ — по (5-44)
Напор воздуха, развиваемый наружным вентилятором (Па)	H — по (5-45)

В результате расчета следует убедиться, что удовлетворяется неравенство $V'_в > V_в$. Иначе потребуется изменить элементы конструкции двигателя с целью увеличения $V'_в$ до определенного значения.

12. Тепловой и вентиляционный расчеты

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
			Тепловой расчет	
371	$P'_{м1}$, Вт	(9-378)	$3\cdot 14{,}9^2\cdot 1{,}4\cdot 0{,}524=489$	$3\cdot 17^2\cdot 1{,}48\cdot 0{,}0384==4985$
372	$S_{п1}$, мм²	(9-379)	$\pi\cdot 153\cdot 115=0{,}55\cdot 10^5$	$\pi\cdot 422\cdot 225=3\cdot 10^5$
373	$П_1$, мм	(9-380)	$2\cdot 18{,}5+99+7{,}07=54$	—
374	$П_1$, мм	(9-381)	—	$2(38+9{,}5)=95$
375	$S_{и.п1}$, мм²	(9-382)	$36\cdot 54\cdot 115=2{,}2\cdot 10^5$	$72\cdot 95\cdot 225=15{,}4\cdot 10^5$
376	$S_{п1}$, мм²	(9-383)	$4\pi\cdot 153\cdot 62{,}65=1{,}2\cdot 10^5$	$4\cdot\pi\cdot 422\cdot 116=6{,}2\cdot 10^5$
377	$h_р$, мм	§ 3-10	$0{,}6\sqrt[4]{132^2}=23$	—
378	$n_р$	§ 3-10	$0{,}6\sqrt[3]{132}=8{,}2$ Принимаем $n_р=12$	—
379	$S_{маш.р}$, мм²	(9-385)	$(\pi\cdot 233+8\cdot 12\cdot 23)\times\times(115+2\cdot 62{,}65)\doteq 7\cdot 10^5$	—
380	$S_{маш.р}$, мм²	(9-384)	—	$\pi\cdot 590(225+2\cdot 116)==8{,}5\cdot 10^5$
381	$p_{п1}$, Вт/мм²	(9-386)	$\dfrac{0{,}21\left(489^2\dfrac{115}{648}+243{,}6\right)}{0{,}55\cdot 10^5}==1{,}6\cdot 10^{-3}$	$\dfrac{0{,}77\left(4985\dfrac{2\cdot 225}{1094}+1537\right)}{3\cdot 10^5}=9{,}2\cdot 10^{-3}$
382	$p_{и.п1}$, Вт/мм²	(9-387)	$\dfrac{489\dfrac{2\cdot 115}{648}}{2{,}2\cdot 10^5}=0{,}8\cdot 10^{-3}$	$\dfrac{4985\dfrac{2\cdot 225}{1094}}{15{,}4\cdot 10^5}=1{,}3\cdot 10^{-3}$
383	$p_{л1}$, $\dfrac{Вт}{мм^2}$	(9-388)	$\dfrac{489\dfrac{2\cdot 209}{648}}{1{,}2\cdot 10^5}=2{,}6\cdot 10^{-3}$	$\dfrac{4985\dfrac{2\cdot 322}{1094}}{6{,}2\cdot 10^5}=4{,}7\cdot 10^{-3}$
384	v_2, м/с	(9-389)	$\dfrac{\pi\cdot 152{,}3\cdot 1500}{60000}=12$	$\dfrac{\pi\cdot 420{,}2\cdot 1000}{60\,000}=22$
385	$\Delta t_{п1}$, °C	(9-390) рис. 9-24	$\dfrac{1{,}6\cdot 10^{-3}}{10{,}4\cdot 10^{-5}}=15{,}4$	$\dfrac{9{,}2\cdot 10^{-3}}{12\cdot 10^{-5}}=76{,}7$
386	$\Delta t_{и.п1}$°C	(9-391) рис. 9-26	$0{,}8\cdot 10^{-3}\left(\dfrac{0{,}25}{16\cdot 10^{-5}}+\dfrac{(9{,}9+7{,}07)}{16\cdot 130\cdot 10^{-5}}\right)=1{,}9$	—

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
387	$b_{и}$, мм	§ 9-13	—	$\frac{9{,}5-1\cdot 3{,}35}{2}=3{,}1$
388	$\Delta t_{и.л1}$ °С	(9-392)	—	$1{,}3\cdot 10^{-3}\,\frac{3{,}1}{16\cdot 10^{-5}}=$ $=25{,}2$
389	$\Delta t_{л1}$, °С	(9-393)	$2{,}6\cdot 10^{-3}/(10{,}4\cdot 10^{-5})=$ $=25$	$4{,}7\cdot 10^{-3}/(12\cdot 10^{-5})=$ $=39$
390	$\Delta t_{и.л1}$, °С	(9-394)	$2{,}6\cdot 10^{-3}\,\frac{18{,}5}{12\cdot 130\cdot 10^{-5}}=$ $=7{,}1$	—
391	$\Delta t_{и.л1}$, °С	(9-395)	—	$4{,}7\cdot 10^{-3}\,\frac{0{,}6}{16\cdot 10^{-5}}=$ $=17{,}6$
392	$\Delta t'_{1}$, °С	(9-396)	$(15{,}4+1{,}9)\,\frac{2\cdot 115}{648}+$ $+(25+7{,}1)\,\frac{2\cdot 209}{648}=26{,}8$	$(76{,}7+25{,}2)\,\frac{2\cdot 225}{1094}+$ $+(39+17{,}6)\times$ $\times\frac{2\cdot 322}{1094}=75{,}2$
393	P'_{Σ}, Вт	(9-398) табл. 9-25	$0{,}21\left(489\,\frac{2\cdot 115}{648}+\right.$ $\left.+243{,}6\right)+489\,\frac{2\cdot 209}{648}+$ $+215+0{,}1\cdot 66{,}3+$ $+43=668$	—
394	P'_{Σ}, Вт	(9-397) табл. 9-25	—	$0{,}77\left(4985\,\frac{2\cdot 225}{1094}+\right.$ $\left.+1537\right)+4985\times$ $\times\frac{2\cdot 322}{1094}+5227+$ $+488+860=12\,270$
395	$\Delta t_{в}$, °С	(9-399) рис. 9-25	$668/(7\cdot 10^{5}\cdot 2{,}55\cdot 10^{-5})=$ $=37{,}4$	$12\,270/(8{,}5\cdot 10^{5}\times$ $\times 107\cdot 10^{-5})=13{,}5$
396	Δt_{1}, °С	(9-400)	$26{,}8+37{,}4=64{,}2$	$75{,}2+13{,}5=88{,}7$
397	$P'_{м2}$, Вт	(9-401)	$3\cdot 12{,}5^{2}\cdot 1{,}4\cdot 0{,}328=215$	$3\cdot 155^{2}\cdot 1{,}48\cdot 0{,}049=$ $=5227$
398	$S_{п2}$, мм²	(9-402)	—	$\pi\cdot 420{,}2\cdot 230=3\cdot 10^{5}$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
399	$П_2$, мм	(9-403)	—	$2(44,3+5,18)=100$
400	$S_{и.п2}$, мм²	(9-404)	—	$81\cdot100\cdot230=19\cdot10^5$
401	$S_{л2}$, мм²	(9-405)	—	$4\pi\cdot420,2\cdot106,2=$ $=5,6\cdot10^5$
402	$p_{п2}$, Вт/мм²	(9-406)	—	$\frac{5227\frac{2\cdot230}{1121}}{3\cdot10^5}=$ $=7,1\cdot/10^{-3}$
403	$P_{и.п2}$, Вт/мм²	(9-407)	—	$\frac{5227\frac{2\cdot230}{1121}}{19\cdot10^5}=1,1\cdot10^{-3}$
404	$p_{л2}$, Вт/мм²	(9-408)	—	$\frac{5227\frac{2\cdot330,2}{1121}}{5,6.10^5}=6\cdot10^{-3}$
405	$\Delta t_{п2}$, °C	(9-409) рис. 9-27	—	$7,1\cdot10^{-3}/(12,3\times$ $\times10^{-5})=57,7$
406	$\Delta t_{и.п2}$ °C	(9-410)	—	$1,1\cdot10^{-3}\cdot1,6/(16\times$ $\times10^{-5})=11$
407	$\Delta t_{л2}$, °C	(9-411)	—	$6\cdot10^{-3}/(12,3\cdot10^{-5})=$ $=48,8$
408	$\Delta t_{и.л2}$, °C	(9-412)	—	$\frac{6\cdot10^{-3}\cdot0,22}{16\cdot10^{-5}}=8,25$
409	$\Delta t'_2$, °C	(9-413)	—	$(57,7+11)\frac{2\cdot230}{1121}+$ $+(48,8+8,25)\times$ $\times\frac{2\cdot330,2}{1121}=61,8$
410	Δt_2, °C	(9-414)	—	$61,8+13,5=75,3$

Вентиляционный расчет

411	$V_в$, м³/с	(5-28)	—	$\frac{12\,270}{1100\cdot2\cdot13,5}=0,41$
412	k_1	(5-40)	—	$3,5\sqrt[4]{(1000/1000)^3}\times$ $\times(0+100)/100=$ $=3,5$
413	$V'_в$, м³/с	(5-39)	—	$3,5(420,2/100)^2\times$ $\times10^{-2}=0,62$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
414	H, Па	(5-41)	—	$7{,}85\,(1000/1000)^2 \times (420{,}2/100)^2 = 140$
415	$D_{\text{корп}}$, мм	(1-27)	$2\,(132 - 6) = 252$	—
416	k_2	(5-43)	$2{,}2\sqrt[4]{(1500/1000)^3} \times \sqrt{252/100} = 4{,}78$	—
417	$V_{\text{в}}$, м³/с	(5-42)	$4{,}78 \cdot 668/1100 \cdot 2 \cdot 37{,}4 = 0{,}04$	—
418	$V'_{\text{в}}$, м³/с	(5-44)	$0{,}6\left(\frac{1500}{1000}\right)\left(\frac{252}{100}\right)^3 \times 10^{-2} = 0{,}144$	—
419	H, Па	(5-45)	$12{,}3\left(\frac{1500}{1000}\right)^2\left(\frac{252}{100}\right)^2 = 175{,}7$	—

§ 9-14. Масса двигателя и динамический момент инерции ротора

Важными техническими показателями асинхронного двигателя являются его масса и динамический момент инерции ротора. Значение последнего необходимо для расчета времени разгона или остановки электродвигателя. Его точное значение может быть определено расчетом динамических моментов инерции отдельных деталей ротора. Приближенное значение динамического момента инерции короткозамкнутого ротора (кг·м²)

$$J_{\text{и.д}} = (0{,}55 \div 0{,}65)\, D^4_{\text{н2}} l_2 \cdot 10^{-12}. \qquad (9\text{-}415)$$

Для фазного ротора значение динамического момента инерции, определенное по (9-415), должно быть увеличено на 5%.

До разработки чертежей на двигатель определение его массы можно выполнить по приближенным формулам в такой последовательности.

Масса изолированных проводов обмотки статора (кг):

при круглом поперечном сечении

$$m_{\text{м1}} = [7{,}55 + 1{,}35\,(d'/d)^2]\, z_1 \times \frac{N_{\text{п1}}}{2}\, l_{\text{ср1}} c s \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}416)$$

при прямоугольном поперечном сечении

$$m_{м1} = \left(7,55 + 1,35\,\frac{s'}{s}\right) z_1 \times \frac{N_{п1}}{2}\, l_{ср1} c s \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}417)$$

Масса алюминия короткозамкнутого ротора с литой или сварной клеткой (кг)

$$m_{ал2} = 2,7\,[z_2 s_{ст} l_2 + 2\pi D_{кл.ср} \times s_{кл} + 1,1 N_л (l_л - l_{кл}) h_л b_л] \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}418)$$

Масса неизолированных проводов обмотки фазного ротора (кг)

$$m_{м2} = 8,9 z_2 (N_{п2}/2)\, l_{ср2} s \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}419)$$

Масса стали сердечников статора и ротора (кг)

$$m_{с\Sigma} = 7,8 l_1 k_с \left[0,785\,(D^2_{н1} - D^2_2) - z_1 s_{п1} - z_2 s_{п2} - \frac{\pi d^2_{к2}}{4}\, n_{к2}\right] \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}420)$$

Масса изоляции статора (кг):

при трапецеидальных полузакрытых пазах

$$m_{и1} = 1,35\,(l_1 + 20)\,(2h_{п1} + 3b_п)\, b_{и1} z_1 \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}421)$$

при прямоугольных полуоткрытых и открытых пазах

$$m_{и1} = 1,35 z_1 [(l_1 + 20)\,(2b_{и1} h_{п1} + 2h_{и1} b_{п1}) + l_{л1} (2b_{и.л1} h_{п1} + h_{и.л1} b_{п1})] \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}422)$$

Масса изоляции фазного ротора (кг)

$$m_{и2} = 1,35 z_2 [(l_2 + 20)\,(2b_{и2} h_{п2} + h_{и2} b_{п2}) + l_{л2} (2b_{и.л2} h_{п2} + h_{и.л2} b_{п2})] \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}423)$$

Масса конструкционных материалов двигателя со степенью защиты IP44 (кг):

$h \leqslant 200$ мм, станина и щиты из алюминиевого сплава, ротор короткозамкнутый;

$$m_к = [(0,21 \div 0,28)\, D^2_{н1} l_1 + (2,2 \div 3)\, D^3_{н1}] \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}424)$$

$h \leqslant 400$ мм, станина и щиты чугунные, ротор короткозамкнутый;

$$m_к = [(0,55 \div 0,75)\, D^2_{н1} l_1 + (2,3 \div 3,1)\, D^3_{н1}] \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}425)$$

то же, ротор фазный;

$$m_к = [(0,55 \div 0,75)\, D^2_{н1} l_1 + (2,8 \div 3,8)\, D^3_{н1}] \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}426)$$

$h \geqslant 400$ мм, сварное исполнение с распределенным трубчатым охладителем, ротор короткозамкнутый;

$$m_к = (1,8 \div 2,5)\, D^2_{н1} l_1 \cdot 10^{-6} + (130 \div 170)\, D^{1,3}_{н1} \cdot 10^{-3} \qquad (9\text{-}427)$$

то же, ротор фазный

$$m_к = (1,8 \div 2,5)\, D^2_{н1} l_1 \cdot 10^{-6} + (150 \div 210)\, D^{1,3}_{н1} \cdot 10^{-3} \qquad (9\text{-}428)$$

Масса конструкционных материалов двигателя со степенью защиты IP23 (кг):

$h \leqslant 250$ мм, станина и щиты чугунные, ротор короткозамкнутый;

$$m_к = [(0,9 \div 1,2)\, D^2_{н1} l_1 + (1,8 \div 2,5) \times D^3_{н1}] \cdot 10^{-6} \qquad (9\text{-}429)$$

$h \leqslant 355$ мм, сварное исполнение, ротор короткозамкнутый;

$$m_к = [(0,9 \div 1,2)\, D^2_{н1} l_1 \cdot 10^{-3} + (10 \div 15)\, D^{1,6}_{н1} \cdot 10^{-3} \qquad (9\text{-}430)$$

То же, ротор фазный;

$$m_к = (0,9 \div 1,2)\, D^2_{н1} l_1 \cdot 10^{-6} + (12 \div 16)\, D^{1,6}_{н1} \cdot 10^{-3} \qquad (9\text{-}431)$$

$h \geqslant 400$ мм, станина и щиты чугунные, ротор короткозамкнутый;

$$m_к = (1,9 \div 2,5)\, D^2_{н1} l_1 \cdot 10^{-6} + (13 \div 17)\, D^{1,6}_{н1} \cdot 10^{-3} \qquad (9\text{-}432)$$

То же, ротор фазный	$m_к = (1,9 \div 2,5)\, D^2_{н1} l_1 \cdot 10^{-6} + (14 \div 19)\, D^{1,6}_{н1} \cdot 10^{-3}$	(9-433)
Масса двигателя с короткозамкнутым ротором (кг)	$m_{дв} = m_{м1} + m_{ал2} + m_{c\Sigma} + m_{и1} + m_к$	(9-434)
То же, с фазным ротором	$m_{дв} = m_{м1} + m_{м2} + m_{c\Sigma} + m_{и1} + m_{и2} + m_к$	(9-435)

Здесь $S' = (a + \Delta_и)(b + \Delta_и)$; $b_п = 0,5(b_1 + b_2)$ — средняя ширина паза; $b_{и1}$, $2b_{и1}$ — из § 9-4; $2b_{и2}$ — из § 9-6; $2b_{и.л1}$ и $2b_{и.л2}$ — двусторонняя толщина изоляции по ширине в лобовой части обмотки статора из приложений 28 и 30, а фазного ротора — из приложения 22; $h_{и1}$ — из § 9-4; $h_{и2}$ — из § 9-6, $h_{и.л1}$ и $h_{и.л2}$ — двусторонняя толщина изоляции по высоте лобовой части обмотки статора; $h_{и.л1} = 2b_{и.л1}$; $h_{и.л2} = 2b_{и.л2}$; $N_л$, $l_л$, $h_л$ из § 3-4; $S_{п1}$ и $S_{п2}$ для полузакрытых пазов — из § 9-4 и 9-5, а для прямоугольных пазов полуоткрытой и открытой формы $S_{п1} = b_{п1} h_{п1}$; $S_{п2} = b_{п2} h_{п2}$.

Для сравнения основных технических показателей спроектированных электродвигателей с показателями аналогичных отечественных электродвигателей можно воспользоваться данными о массе, динамическом моменте инерции, энергетических и других показателях этих электродвигателей, приведенными в каталогах.

Кроме того, может быть произведена общая оценка технического уровня спроектированных двигателей по обобщенному показателю Э, который рассчитывают в соответствии с материалами гл. 7.

Примеры расчета машин

13. Масса двигателя и динамический момент инерции ротора

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
420	$m_{м1}$, кг	(9-416)	$\left[7,55 + 1,35 \times \left(\frac{1,405}{1,32}\right)^2\right] 36 \frac{21}{2} - 648 \cdot 2 \cdot 1,368 \cdot 10^{-6} = 6,1$	—
421	$m_{м1}$, кг	(9-417)	—	$\left[7,55 + 1,35 \times \frac{(1,8 + 0,15)}{5,667} \times \frac{(3,35 + 0,15)}{1}\right] 72 \times \frac{17}{2} 1094 \cdot 2 \cdot 5,667 \times 10^{-6} = 69,6$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
422	$m_{ал2}$, кг	(9-418)	$2{,}7\,[34\cdot 95{,}9\cdot 115 + 2\pi\cdot 121{,}7\cdot 326 + 1{,}1\cdot 11\,(44 - 10{,}65)\,26\cdot 3]\,10^{-6} = 1{,}77$	—
423	$m_{м2}$, кг	(9-419)	—	$8{,}9\cdot 81\,(2/2)\,1121\cdot 58{,}56 \times 10^{-6} = 47{,}3$
424	$m_{с\Sigma}$, кг	(9-420)	$7{,}8\cdot 115\cdot 0{,}97\,[0{,}785 \times (233^2 - 54^2) - 36\cdot 137{,}6 - 34 \times 95{,}5 - 0]\,10^{-6} = 27{,}9$	$7{,}8\cdot 225\cdot 0{,}95 \times \left[0{,}785/590^2 - 140^2) - 72\,(38\cdot 9{,}5) - 81\,(44{,}3\cdot 5\cdot 18) - \frac{\pi\cdot 40^2}{4}\,12\right] 10^{-6} = 330$
425	$m_{и1}$, кг	(9-421)	$1{,}35\,(115 + 20)\,(2 \times 18{,}5 + 2\cdot 8{,}5)\,0{,}25 \times 36\cdot 10^{-6} = 0{,}1$	—
426	$m_{и1}$, кг	(9-422)	—	$1{,}35\cdot 72\,[(225+20)\,(2{,}2 \times 38 + 4{,}5\cdot 9{,}5) + 322 \times (0{,}6\cdot 38 + 0{,}6\cdot 9{,}5) \times 10^{-6} = 3{,}9$
427	$m_{и2}$, кг	(9-423)	—	$1{,}35\cdot 81\,[(230 + 20) \times (1{,}6\cdot 44{,}3 + 4{,}5\cdot 5{,}18) + 330{,}7\,(1\cdot 44{,}3 + 1\cdot 5{,}18)]\,10^{-6} = 4{,}4$
428	$m_{к}$, кг	(9-425)	$(0{,}6\cdot 233^2\cdot 115 + 2{,}5\cdot 233^3)\,10^{-6} = 35{,}4$	—
429	$m_{к}$, кг	(9-431)	—	$1{,}0\cdot 590^2\cdot 225\cdot 10^{-6} + 13\cdot 590^{1,6}\cdot 10^{-3} = 431$
430	$m_{дв}$, кг	(9-434)	$6{,}1 + 1{,}77 + 27{,}9 + 0{,}1 + 35{,}4 = 71{,}3$	—
431	$m_{дв}$, кг	(9-435)	—	$69{,}6 + 47{,}3 + 330 + 3{,}9 + 4{,}4 + 431 = 886$
432	$J_{и.д}$, кг·м²	(9-415)	$0{,}65\cdot 152{,}3^4\cdot 115 \times 10^{-12} = 0{,}04$	$1{,}05\,(0{,}65\cdot 420{,}2^4\cdot 230 \times 10^{-12}) = 4{,}9$

§ 9-15. Расчет надежности обмотки статора

В гл. 6 было показано, что надежность асинхронных двигателей рассматриваемого диапазона мощностей определяется в основном надежностью обмотки статора. Для асинхронных двигателей со всыпной обмоткой разработан отраслевой стандарт ОСТ 16.0.800.821—81 для расчета надежности обмотки статора. В § 6-3 были рассмотрены две математические модели, которые могут быть использованы при расчете надежности обмотки. Вторая из рассмотренных моделей послужила основой ОСТ 16.0.800.821—81. Методика расчета, изложенная в этом ОСТе, требует применения ЭВМ, что не всегда возможно, поэтому авторами ОСТа на базе полной методики расчета была разработана упрощенная. Погрешность расчетов по упрощенной методике не превышает 20% при значениях вероятности безотказной работы обмотки $P \geqslant 0{,}7$.

В упрощенную методику расчета введено понятие элементарного участка длиной $l_{эл}$. Величина $l_{эл}$ определяется из условия равенства вероятности отказа в месте дефекта на одном из касающихся витков при учете всех возможных расстояний до дефекта на другом витке (с учетом вероятности его появления) и вероятности отказа в одном из касающихся витков с учетом дефектов на другом витке только в пределах $l_{эл}$. При этом считают, что все дефекты на расстоянии, меньшем или равном $l_{эл}$, совпадают. Для проведения расчетов по упрощенной методике необходимы данные, полученные из предыдущих расчетов. Ряд исходных данных должен быть получен экспериментально на используемых обмоточных проводах и изоляционных материалах, примененных для корпусной и межфазной изоляции. Методы получения этих экспериментальных данных описаны в приложениях к упомянутому отраслевому стандарту. При отсутствии экспериментальных данных можно воспользоваться рекомендуемыми усредненными значениями параметров.

На основании теоремы умножения вероятность безотказной работы обмотки

$$P_{об} = P_{м.в} P_{п} P_{м.ф}, \tag{9-436}$$

где $P_{м.в}$, $P_{п}$, $P_{м.ф}$ — соответственно вероятности безотказной работы межвитковой, корпусной и межфазовой изоляции.

Многочисленные расчетные и экспериментальные данные показывают, что вероятность безотказной работы корпусной и межфазовой изоляции значительно выше, чем у межвитковой; для $\tau = 10\,000$ ч имеем $P_{п} P_{м.ф} \approx 0{,}999$, а для $\tau = 20\,000$ ч $P_{п} P_{м.ф} \approx 0{,}995$. Поэтому при выполнении расчетов надежности всыпной обмотки можно ограничиться расчетом надежности межвитковой изоляции, выполнив затем корректировку результатов расчета. В соответствии с изложенным рассмотрим упрощенную методику расчета надежности межвитковой изоляции асинхронных двигателей со всыпной обмоткой.

Наименование параметров и их условные обозначения	Выбор величины параметра
Наработка, для которой определяется вероятность безотказной работы $P_{об}$, τ, ч	Задается в ТЗ (ТУ); по ГОСТ 19523—74 $\tau = 10^4$ ч при $P_{об} = 0,9$
Вероятность наличия хотя бы одного дефекта изоляции провода длиной 100 мм после укладки обмотки q_1	При отсутствии экспериментальных данных $q_1 = 0,1 \div 0,35$
Периметр свободной площади слоя обмотки $П$, мм	Для двухслойной обмотки $П = b_1 + b_2 + h_{п1}$; для однослойной $П = b_1 + b_2 + 2h_{п1}$
Коэффициент, характеризующий качество пропитки, $k_{пр}$	При отсутствии экспериментальных данных $k_{пр} = 0,3 \div 0,7$
Длина образца провода $l_{обр}$, мм	Можно принять $l_{обр} = 100$ мм
Среднее значение $\overline{U}_1$, кВ и среднее квадратичное отклонение фазных коммутационных перенапряжений $\sigma_{\overline{U}_1}$, кВ	При отсутствии экспериментальных данных $\overline{U}_1 = 1,3 \div 1,6$ кВ; $\sigma_{\overline{U}_1} = 0,3 \div 0,4$ кВ
Длина элементального участка $l_{эл}$, мм	Принимают $l_{эл} = 0,11 \div 0,12$ мм
Средняя допустимая температура обмотки $\overline{t}$, °С ее среднее квадратичное отклонение $\sigma_{\overline{t}}$, °С	Для класса В $\overline{t} = 120$ °С; для F $\overline{t} = 140$ °С; для Н $\overline{t} = 165$ °С; $\sigma_{\overline{t}} = 5$ °С
Максимально допустимая температура для данного класса нагревостойкости изоляции t_0, °С	Для класса В $\overline{t}_0 = 130$ °С; для F $\overline{t}_0 = 155$ °С; для Н $t_0 = 180$ °С
Среднее значение напряжения перекрытия по поверхности изоляции промежутка толщиной, равной двусторонней толщине изоляции $\overline{U}_z$ (кВ), и среднее квадратичное отклонение его $\sigma_{\overline{U}_z}$, кВ	Принимают $\overline{U}_z = (0,8 \div 1)$ кВ $\sigma_{\overline{U}_z} = (0,2 \div 0,3)$ кВ
Частота включений электродвигателя $f_{вкл}$	Принимается по ОСТ 16.0.510.037—78 в зависимости от предполагаемой группы эксплуатации. Для нормальной группы эксплуатации $t_{вкл} = (2 \div 10)$ ч$^{-1}$
Коэффициенты уравнения, определяющие скорость роста дефектности витковой изоляции	При отсутствии экспериментальных данных можно принять: $c_в = (0,1 \div 0,2) \cdot 10^{-6}$ 1/(мм·ч) $a_в = (0,04 \div 0,08)$ °С$^{-1}$

Примечание. Для выполнения расчетов необходимы также следующие исходные данные (см. гл. 9): $k_{сл}$—количество слоев обмотки; $N_с = N_{п1}c/k_{сл}$ — количество элементарных витков в секции; $\Delta_{пр} = d' - d$ — двусторонняя толщина провода c; $k_п$; z_1; a_1; $l_{ср1}$; d'.

Расчет надежности всыпных обмоток статора асинхронного двигателя производится в такой последовательности.

Дефектность витковой изоляции до начала эксплуатации электродвигателя (мм$^{-1}$)
$$\lambda_0 = -\ln(1 - q_1) k_{пр}/l_{обр} \quad (9\text{-}437)$$

Вероятность плотного касания соседних витков
$$q = 0,93\sqrt{k_п} \quad (9\text{-}438)$$

Количество проводников, находящихся в наружном слое секции (по периметру секции)
$$N_{нар} = Пq/d' \quad (9\text{-}439)$$

во внутреннем слое секции
$$N_{вн} = N_с - N_{нар} \quad (9\text{-}440)$$

Доля пар соседних элементарных витков, принадлежащих к одному эффективному

$$P_п = \left[1 - \left(1 - \frac{c-1}{N_с}\right)^3\right] \times \left(\frac{N_с}{2N_с - c}\right) \qquad (9\text{-}441)$$

Общая длина пар соседних витков в обмотке (мм)

$$L = (1 - P_п)(N_{нар} + 1{,}5N_{вн} - 1{,}5)k_{сл}l_{ср}z_1 \qquad (9\text{-}442)$$

Количество последовательно соединенных секций в фазе

$$n_с = z_1 k_{сл}/(6a_1) \qquad (9\text{-}443)$$

Среднее значение и среднее квадратичное отклонение величин фазных коммутационных перенапряжений на секции (кВ)

$$\overline{U}_с = \overline{U}_1/n_с \qquad (9\text{-}444)$$

$$\sigma_{\overline{U}_с} = \sigma_{\overline{U}_1}/n_с \qquad (9\text{-}445)$$

Номинальное фазное напряжение, приходящееся на секцию (кВ)

$$U_с = \sqrt{2}\,U_1 10^{-3}/n_с \qquad (9\text{-}446)$$

Вероятность отказа витковой изоляции при воздействии одного импульса перенапряжения и при условии, что на касающихся витках имеются совпадающие дефекты

$$q_z = \frac{3(7\cdot 10^{-3}U_с - 0{,}154\cdot 10^{-3}U_с}{\Delta_{пр}} B, \qquad (9\text{-}447)$$

где $B = \int_0^1 F\left(\frac{k\overline{U}_с - \overline{U}_z}{\sqrt{k^2\sigma^2_{\overline{U}_с} - \sigma^2_{\overline{U}_z}}}\right)k(k-1)^2\,dk$ — интеграл (см. приложение 40; пользоваться интерполяцией); k — крайность коммутационных перенапряжений

Скорость роста дефектности витковой изоляции (мм$^{-1}$)

$$H_в = c_в \exp\left[0{,}0014 f_{вкл} + a_в(\overline{t} - \overline{t}_0 + 0{,}5a_в\sigma^2_{\overline{t}})\right] \qquad (9\text{-}448)$$

Вероятность возникновения короткого замыкания витковой изоляции на длине касающихся витков в течение времени τ

$$P_1 = 2l^2_{эл} q q_z f_{вкл}\left[\lambda^2_0\tau + \lambda_0 H_в\tau^2 + \frac{H^2_в}{3}\tau^3\right] \qquad (9\text{-}449)$$

Вероятность отказа межвитковой изоляции в течение времени τ

$$Q_{м.в} = 1 - (1 - P_1)^{L/l_{эл}} \qquad (9\text{-}450)$$

Вероятность безотказной работы межвитковой изоляции в течение времени τ

$$P_{м.в} = 1 - Q_{м.в} \qquad (9\text{-}451)$$

Вероятность безотказной работы обмотки статора $P_{об}$ за время τ (для $\tau = 10\,000$ ч имеем $P_п P_{м.ф} = 0{,}999$; для $\tau = 20\,000$ ч — $P_п P_{м.ф} = 0{,}995$)

$P_{об}$ — по (9-436)

Пример расчета см. стр. 204

§ 9-16. Применение ЭВМ для электромагнитных расчетов и расчетных исследований

Выполнение электромагнитных и других расчетов электродвигателей «ручным» счетом целесообразно лишь на первом этапе учебного процесса, при котором студент познает методику проектирования. На дальнейших этапах обучения и особенно при дипломном проектировании целесообразно проводить расчеты и исследования с применением ЭВМ. В настоящем параграфе приведена для примера программа проведения таких исследований

Пример расчета машины

14. Расчет надежности всыпной обмотки статора

Исходные данные для расчета

Обозначение параметра	Величина параметра	Обозначение параметра	Величина параметра
τ	10 000 ч	t_0	130 °C
q_1	0,2	$\overline{U}_z$	0,9 кВ
$П$	9,9+7,07·2·18,5=54 мм	$\sigma_{\overline{U}_z}$	0,25 кВ
		$f_{вкл}$	4 $ч^{-1}$
$k_{пр}$	0,5	$c_в$	0,15·10^{-6} 1/(мм·ч)
$l_{обр}$	100 мм	$a_в$	0,05 $°C^{-1}$
$\overline{U}_1$	1,4 кВ	$k_{сл}$	1
$\sigma_{\overline{U}_1}$	0,35 кВ	$N_с$	21·2/1=42
$l_{эл}$	0,11 мм	$\Delta_{пр}$	1,405—1,32=0,085 мм
$\overline{t}$	120 °C	d	1,32 мм
$\sigma_{\overline{t}}$	5 °C	c	2
z_1	36	$k_п$	0,73
a_1	1	$l_{ср1}$	648 мм
d'	1,405 мм	z_1	36

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1
433	λ_0, $мм^{-1}$	(9-437)	$\frac{\ln(1-0,2)}{100}0,5=0,00116$
434	q	(9-438)	$0,93\sqrt{0,73}=0,79$
435	$N_{нар}$	(9-439)	54·0,79/1,405=30
436	$N_{вн}$	(9-440)	42—30=12
437	$P_п$	(9-441)	$\left[1-\left(1\frac{2-1}{42}\right)^3\right]\frac{42}{2\cdot 42-2}=0,036$
438	L, мм	(9-442)	$(1-0,036)(30+1,5\cdot 12-1,5)\,1\cdot 648\cdot 36=1,04\cdot 10^6$
439	$n_с$	(9-443)	36·1/(6·1)=6
440	$\overline{U}_с$, кВ	(9-444)	1,4/6=0,23
441	$\sigma_{\overline{U}_с}$, кВ	(9-445)	0,35/6=0,058
442	$U_с$, кВ	(9-446)	$\sqrt{2}\,220\cdot 10^{-3}/6=0,052$
443	В	приложение 40	Для $\overline{U}_с=0,23$ кВ; $\sigma_{\overline{U}_с}=0,058$ кВ; $\overline{U}_z=0,9$ кВ; $\sigma_{\overline{U}_z}=0,25$ кВ определяем $В=6,58\cdot 10^{-5}$
444	q_z	(9-447)	$\frac{3\,(7\cdot 10^{-3}\cdot 0,052-0,154\cdot 10^{-3}\cdot 0,23)}{0,085}\,6,58\times 10^{-5}=0,76\cdot 10^{-6}$
445	$H_в$	(9-448)	$0,15\cdot 10^{-6}\exp[0,0014\cdot 4+0,06\,(120-130+0,5\cdot 0,06\cdot 5^2)=0,087\cdot 10^{-6}$
446	P_1	(9-449)	$2\cdot 0,11^2\cdot 0,79\cdot 0,76\cdot 10^{-6}\cdot 4\,[0,00116^2\cdot 10\,000+0,00116\cdot 0,087\cdot 10^{-6}\cdot 10\,000^2+([0,087\cdot 10^{-6}]^2/3)\cdot 10\,000^3]=1,5\cdot 10^{-9}$
447	$Q_{м.в}$	(9-450)	$1-(1-1,5\cdot 10^{-9})\,1,04\cdot 10^6/0,11=0,015$
448	$P_{м.в}$	(9-451)	1—0,015=0,985
449	$P_{об}$	(9-436)	0,985·0,999=0,984
450	Сравнение $P_{об}$ с заданным (по ГОСТ 15523—74)		0,984>0,9

на одном исполнении асинхронных двигателей (пазы статора трапецеидальные, обмотка однослойная, ротор короткозамкнутый). Алгоритм программы базируется на расчетных формулах настоящей главы. Программа предусматривает возможность варьирования предварительно выбираемых параметров: линейной нагрузки статора A'_1, индукции в воздушном зазоре B'_δ, воздушного зазора δ, индукции в зубцах ротора $B'_{з2}$, индукции в зубцах статора $B'_{з1}$ и количества пазов на полюс и фазу q_1. Для варьирования перечисленных параметров предусмотрен ручной ввод.

Описание программы*. Программа написана на языке *PL/1*, отлажена с использованием компилятора с *PL/1* уровня *F*, работающего под управлением операционной системы ОС ЕС на ЭВМ единой серии. Приводимые примеры рассчитаны на операционную систему ОС ЕС. В табл. 9-26 приведены условные обозначения параметров, использованных в расчете, и их идентификаторы в тексте программы.

Для работы программы необходимо задать исходные данные, которые наносят на перфокарты (одну или несколько) в произвольном порядке с соблюдением следующих правил:

1. Каждая величина исходных данных задается в форме идентификатор=число. При записи числа в качестве разделителя целой и дробной части используется точка.

2. Отдельные величины разделяются запятыми и произвольным количеством пробелов. После последней величины ставится точка с запятой.

3. Должны быть заданы все необходимые величины. Перечислим их с указанием наименований, принятого обозначения, единицы измерения и идентификатора: номинальная отдаваемая мощность P_2 (кВт) *P*2; частота сети — *f* (Гц) *F*; номинальное фазное напряжение — U_1 (В) *U*1; синхронная частота вращения — n_1 (об/мин) *N*1; количество полюсов — 2*p* (штук) 2*P*; высота оси вращения — *h* (мм) *H*.

При использовании программы имеется возможность анализировать влияние некоторых параметров на результат расчета. С этой целью в процессе работы используется ручной ввод; задаются отклонения в процентах исследуемых параметров от вычисленного в процессе работы значения (как исключение, параметр q_1 задается абсолютным значением).

Форма задания параметров для ручного ввода такая же, как для исходных данных. Если ручной ввод отсутствует, то вслед за исходными данными необходимо ставить точку с запятой. Далее перечисляются возможные параметры для ручного ввода с указанием их условного обозначения, диапазона изменений, единиц (проценты или абсолютное значение) и идентификатора: A'_1, проценты, — 25÷25, OA1#; B'_δ, проценты, — 25÷25,OBDLT#; δ, проценты, — 50÷50, O#DLT; $B'_{з1}$, проценты, —25÷25, O#BZ1; $B'_{з2}$, проценты, — 25÷25, OBZ2; q_1, абсолютное значение, допу-

* Программа составлена инженером *Л. О. Гольдбергом.*

Условные обозначения	Идентификатор	Условные обозначения	Идентификатор	Условные обозначения	Идентификатор	Условные обозначения	Идентификатор
A'_1	A1 #	β	○#B	φ	○#FI	$I_{м*}$	IMZ
a_1	A1	c	C	$G_{з1}$	GZ1 #	$I_{ср}$	ICR
A_1	○#A1	$\cos\varphi'$	COS F #	$G_{с1}$	GC1	$I_{оа}$	IOA
α	○#ALF	$\cos\varphi_0$	COS FO	$h_р$	HR	I_2	I2
$\alpha_{ск}$	○# ALFCK	$\cos\varphi$	COS F	h	H	I_0	IO
$(A_1J_1)_{доп}$	A1J1	$D_{н1}$	DH1	$h_к$	HK	$I_{с.а}$	ICA
A_2	○#A2	D_1	D1	h_2	H2	I''_2	I2 ##
$B_{\delta'}$	BDLT#	$D_{н2}$	DH2	$h_с$	HC	$I_{а1}$	IA1
B_δ	BDLT	δ	○#DLT	$h_{с1}$	HC1	$I_{р1}$	IR1
$B_{с1}$	BC1	D_2	D_2	$h_{п1}$	HP1	$I_{ст}$	ICT
$B_{з1}$	○#BZ1	d''	D # #	$h_{ш1}$	HCH1	$I_{кл}$	IKL
$b_{з1}$	BZ1	d	D	$h_{п2}$	HP2	$I''_{п2}$	IP2##
$b_с$	BC	d'	D #	$h_{с2}$	HC2	$I_{п.р1}$	IPR1
b_1	B1	$D_{кл.ср}$	DKLCP	$h_{ш2}$	HCH2	J_1	J1
$b_{ш2}$	BCH2	ξ	○#DZ	h_1	H1	$J_{ст2}$	JCT2
$b_{ш1}$	BCH1	E	E	$h_{кл}$	HKL	$k_н$	KH
$b_п$	BP	f	F	$H_{з1}$	HZ1	η'	KПD#
b_2	B2	Φ'	○#F#	$H_{з2}$	HZ2	$k'_{об1}$	KOB1#
$b_{ср1}$	BCP1	Φ	○#F	$H_{с1}$	○#HC1	k_1	K1
$B_{с2}$	○#BC2	F_δ	F○#DLT	$H_{с2}$	○#HC2	k_2	K2
$b_{з2}$	BZ2	$F_{з2}$	FZ2	$h_{ст}$	HCT	$k_с$	KC
$\beta_{ск}$	○#BCK	$F_{с1}$	○#FC1	$I_{п1}$	IP1	$k_{р1}$	KP1
$b_р$	BR	$F_{з1}$	FZ1	$I_{п.а1}$	IPA1	$k_{об1}$	KOB1
$\beta_{ск2}$	○#BCK2	$F_{с2}$	○#FC2	$I''_{м2}$	IM2##	$k'_п$	KП#
$k_{\delta1}$	K○# DLT1	F_Σ	FSM	I_1	I1	$k_п$	KП
$k_{\delta2}$	K○# DLT2	λ_2	○#LM2	$I_м$	IM	k_5	K5
k_δ	K○# DLT	$\lambda_{п1пер}$	○# LMP1PER	q_2	Q2	U_1	U1
$k_{нас}$	KHAC	$\lambda_{1пер}$	○#LM1PER	r_1	R1	v	V
$k_{ш1}$	KCH1	$\lambda_{п2пер}$	○# LMP2PER	r_2	R2	w_1	W1
$k_{д1}$	KD1	$\lambda_{2пер}$	○#LM2PER	r_{1*}	R1Z	w'_1	W1#
$k_{пр2}$	KPR2	$\lambda_{п2п}$	○#LMP2P	проверка r_{1*}		$x_м$	XM
		$\lambda_{2п}$	○#LM2P	r_{1*}	R1Z○	$x_{м*}$	XMZ
				$r_{ст}$	RCT	x_1	X1

Продолжение

Условные обозначения	Идентификатор	Условные обозначения	Идентификатор	Условные обозначения	Идентификатор	Условные обозначения	Идентификатор
$k_{ск}$	KCK	$\lambda_{кл}$	○# LMKL	проверка P_2		t_1	T1
$k_{пр1}$	KPR1	$\lambda_{ск}$	○# LMCK	P_2	P2○	$t_{ср}$	TCP
$k_{д2}$	KD2	$M_{max}/M_н$	MMMH	ψ	○#PSI	t_2	T2
η	KPD	$m_т$	MT	q_1	Q1	τ_1	○#T1
$k_{в.т}$	KBT	$N_{п1}$	NP1	$r_{кл}$	RKL	τ	○#T
$k_{I_п}$	KIP	$N'_{п1}$	NP1#	$r_{1п}$	R1P	x_{1*}	X1Z
$k_{M_п}$	KMP	n_1	N1	$r_{2п}$	R2P	проверка x_{1*}	
$k_{мх}$	KMX	P_2	P2	r'_2	R2#	x_{1*}	X1Z○
k'_β	K○#B#	$2p$	#2P	r'_{2*}	R2Z#	x_2	X2
l'_1	L1#	p'	P#	r'_1	R1#	x'_2	X2#
l_1	L1	$p_{з1}$	PZ1	r''_2	R2##	x'_{2*}	X2Z#
λ_1	○#LM1	$p_{с1}$	PC1	$r_к$	RK	x''_2	X2##
l_2	L2	$P_{с.м1}$	PCM1	$R_н$	○#RH	$x_к$	XK
$l_{л1}$	LL1	$P_{сΣ}$	PCSM	ρ_1	○#R1	$x_{пер}$	XPER
$l_{ср1}$	LCR1	$P_{мx}$	PMX	$s_н$	SI	$x_{пост}$	XPOST
$l_{в1}$	LB1	$P_д$	PD	$s_{п1}'$	SP1#	$x_{к.п}$	XKP
$l_{кл}$	LKL	P'_2	P2#	$s_{п1}$	SP1	x'_1	X1#
$L_{з2}$	LZ2	$P_{м1}$	PM1	$s_{кл}$	SKL	$y_{п1}$	YP1
$L_{с1}$	○#LC1	$P_{м2}$	PM2	$s_{ст}$	SCT	z_1	Z1
$L_{с2}$	○#LC2	P_Σ	PSM	$s_{п2}$	SP2	z_2	Z2
$\lambda_{п1}$	○# LMP1	P_1	P1	$s_{пр}$	SPR	$z_н$	ZH
$\lambda_{д1}$	○# LMD1	проверка P_1		$s''_{п1}$	SP1##	$z_к$	ZK
$\lambda_{л1}$	○# LML1	P_1	P1○	s	S	$z_м$	ZM
$\lambda_{п2}$	○# LMP2	P_2	P2	$s_н$	SH	z_∞	Z8
$\lambda_{д2}$	○# LMD2			$s_м$	SM	$z_{к.п}$	ZKP
				$s_р$	SR		

стимые значения: для $2p=2$ значения $q_1=4$; 6; для $2p=4$ значения $q_1=2$; 3; 4; для $2p=6$ значения $q_1=2$; 3; для $2p=8$ значения $q_1=1{,}5$; 2.

Идентификатор — OQ1.

При ручном вводе следует иметь в виду, что произведение параметров A'_1 и B'_δ остается постоянным, вычисленным програм-

мой без учета ручного ввода. Поэтому изменение любого из этих двух параметров приводит к изменению другого для сохранения неизменным их произведения. Одновременное задание вручную этих величин считается ошибкой.

Алгоритм расчета построен таким образом, что для обнаружения возможных ошибок производится ряд проверок. Эти проверки заключаются в сравнении отдельных величин, вычисляемых двумя разными способами, которые должны дать примерно одинаковый результат. В предлагаемой программе проверке подвергаются значения величин x_{1*}, r_{1*}, P_1 и P_2. Значения сравниваются с определенной точностью, стандартно принимаемой равной 2%, но которую, при желании, можно изменить для каждой из величин в отдельности. В случае несовпадения результатов проверки для какой-либо величины программа печатает соответствующее сообщение и заканчивает работу.

Форма задания точности соответствует форме задания исходных данных. Необходимые идентификаторы для задания точности: для x_{1*} — EPSX; для r_{1*} — EPSR; для P_1 — EPSP1; для P_2 — EPSP2.

Точность проверок задается при составлении задания для запуска программы в поле PARM оператора EXEC на шаге выполнения программы. Если точность принимается стандартная, поле PARM опускается.

Результатом работы программы является листинг с напечатанными значениями точности проверок расчета, исходных данных, ручного ввода, сообщениями об ошибках или нормальном завершении расчета и со всеми вычисленными значениями необходимых параметров. Значения печатаются в виде идентификатор=число.

Рассмотрим два примера заданий на запуск программы, нанесенной на перфокарты.

Пример 1. Ввод исходных данных с перфокарт. Ручной ввод отсутствует. Точность проверок стандартная.

```
|| EXAMPLE1 JOB (3, 1), 'ИВАНОВ', REGION=1ØØK
||        EXEC PL1LFCLG, PARM. LKED=LET
||      SYSIN DD *
      программа на перфокартах
|| GO. SYSIN DD *
#2p=4, P2=7,5, F=5Ø, U1=22Ø, H=153, N11=15ØØ;
```

Пример 2. Ввод исходных данных с перфокарт. Два параметра задаются с помощью ручного ввода. Задается также точность проверок для X_{1*} и P_2, равная соответственно 0,5 и 3%.

```
|| EXAMPLE2 JOB (3, 1), 'ИВАНОВ', REGION=1ØØK
||        EXEC PL1LFCLG, PARM. LKED=LET,
                   PARM. GO='EPSX=.5, EPSP2=3; '
||      SYSIN DD *
      программа на перфокартах *
|| GO. SYSIN DD *
   # 2p=4, U1=22Ø, N1=15ØØ, P2=7.5,
     F=5Ø, H=153;
     OQ1=4, O#DLT=—4;
```

Текст программы

```
PROF:  PROC(PARM) OPTIONS(MAIN) REORDER;
         DCL PARM CHAR(100) VAR,
             (EPSX,EPSR,EPSP1,EPSP2) INIT(2);
       IF PARM¬='' THEN GET STRING(PARM) DATA(EPSX,EPSR,EPSP1,EPSP2);
PUT PAGE EDIT('ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРОВЕРОК ВЫЧИСЛЕНИЙ (В %%)',
                          'X1Z-',EPSX,'R1Z-',EPSR,'P1-',EPSP1,'P2-',EPSP2)
                            (X(10),A,SKIP(2),(4)(A,F(4,1),X(4)));
         DCL #¬#2P(4) FIXED BIN(15) STATIC INIT(2,4,6,8),
             #¬K1(4) FLOAT DEC STATIC INIT(.93,1,1,1),
             #¬K2(4) FLOAT DEC STATIC INIT(1,1,1,1.2),
             #¬A1(4) STATIC INIT(1,1,3,2) FIXED BIN,
             #¬BC1(4) STATIC INIT((2)1.65,1.5,1.2),
             #¬KOB1#(4) STATIC INIT(.79,(3).94),
             #¬WK2(4) STATIC INIT(.61,.68,(2).72),
             #¬WK3(4) STATIC INIT (4,5,3,3),
             #¬H(10) FIXED BIN STATIC INIT(50,56,63,71,80,90,100,
                                             112,132,160),
             #¬DH1(10) FIXED BIN STATIC INIT(86,96,108,122,139,157,
                                             175,197,233,285),
             #¬BP (10) STATIC INIT((5).2,(4).25,.4),
             #¬Ж#DLT(4,10) STATIC INIT(.25,.3,(3).35,.4,.45,.5,.6,.8,
                  (6).25,(2).3,.35,.5,(2)((6).25,.3,.3,.35,.45)),
             #¬Q1(4,10) STATIC  INIT((9)4,6,(4)2,(5)3,4,(7)2,(3)3,
                                        (7)1.5,(3)2),
             #¬WK1(4,10) STATIC INIT((13).49,(7).58,(3)((3).4,(7).38)),
             #¬P2(16) STATIC INIT(.12,.18,.25,.37,.55,.75,1.1,1.5,
                                  2.2,3,4,5.3,7.5,11,15,18.5),
             #¬KPD#(4,16) STATIC INIT(.62,.66,.69,.72,.75,.76,.79,
                .81,.83,.85,.86,.87,.88,(2).89,.9,.59,.63,.65,.68,
                  .71,.73,.76,.78,.8,.82,.84,.85,.87,.88,.89,.9,
                 (2).56,.61,.65,.68,.7,.73,.75,.78,.8,.81,.83,.85,
                .87,.88,.89,(3).56,.61,.65,.68,.71,.74,.76,.79,.8,
                .82,.84,.86,.88,.89),
            #¬COSF#(4,16) STATIC INIT(.71,.745,.765,.79,.805,.81,.83,
                 .835,.845,.85,.86,.87,.875,.88,.885,.895,.66,.69,
                 .71,.735,.755,.77,.79,.8,.82,.83,.84,.85,.86,.87,
               .88,.89,(5).71,.73,.75,.77,.79,.8,.82,.83,.84,.86,
                 .865,.875,(7).68,.7,.725,.745,.76,.775,.79,.81,
                   .82,.825),
             #¬Q1#(6) STATIC INIT(1.5,2,3,#5,.01),
           #¬KD1(6) STATIC INIT(.049,.0285,.0141,.0089,6.5E-3,.0052),
             #¬Z1(4) FIXED BIN STATIC  INIT(24,36,48,54),
             #¬Z2(4,4) FIXED BIN STATIC INIT(19,(3)28,18,34,38,38,
                                        28,28,51,51,28,28,44,44),
             #¬BCH1(4,10) STATIC INIT((2)((3)1.8,2,3,3,(2)3.5,4,4),
                                  (2)((3)1.8,2,(2)2.7,3,3,(2)3.6)),
             #¬Z2P(8) STATIC INIT(7,9,9.33333,11,14,17,19,28),
             #¬KP1(5,8) STATIC INIT(1.01,1,1,.99,.975,.96,(2).95,
                1.01,1,1,.98,.96,.93,.92,.92,1.01,(2).99,.97,.94,
                    .91,.89,.83,(4).95,.91,.88,.85,.78,(8).68);
         DCL (KPD#,COSF#,KOB1#,A1#,ЖA1#,BDLT#,ЖBDLT#,K1,K2,Q1,ЖQ1,
             Ж#BCK INIT(1),Ж#DLT,ЖЖ#DLT,Q2, ЖЖ#BZ1,BC,HC,HCH1,
             BCH1,BP,KP# INIT(.72E0),D,D#,S,K5,Ж#BZ2, ЖBZ2,HCH,BCH,
             P2,F,U1,MT INIT(1.22),Ж#B INIT(1),KЖ#B# INIT(1E0),
             HK INIT(.7E0),H2 INIT(.6E0),KC INIT(.97E0)) STATIC DEC
               FLOAT,
             (N1,#2P,L1,Z1,L2,Z2,A1,NP1,C,W1) FIXED BIN(15) STATIC,
             (H,DH1) FIXED BIN(31) STATIC,
             (WWW,WWW1,PI INIT(3.1415926536E0),
```

```
        ¤#A1,¤#ALF,¤#ALFCK,A1J1,¤#A2,BDLT,BZ1,B1,B2,BCP1,¤#BC2,BCJ,
¤#BZ1,BZ2,BR,¤#BCK2,COSF,COSFO,DH2,D1,D2,D##,DKLCP,¤#DZ,E,¤#F#,¤#F,
        F¤#DLT,FZ2,¤#FC1,FZ1,¤#FC2,FSM,¤#FI,GZ1#,GC1,HR,HC1,HP1,HP2
          HC2,H1,HKL,HZ1,HZ2,¤#HC1,¤#HC2,HCT,IP1,IPA1,IM2##,I1,IM,
          IMZ,ICP,IOA,I2,IQ,ICA,I2##,IA1,IR1,ICT,IKL,IP2##,IPR1,
          J1,JCT2,KH,KP1,KCB1,KP,K¤#DLT1,K¤#DLT2,K¤#DLT,KHAC,KCH1,
          KD1,KPR2,KCK,KPRI,KD2,KPD,KBT,KIP,KMP,KMX,L1#,¤#LM1,LL1,
    LCP1,LB1,LKL,LZ2,¤#LC1,¤#LC2,¤#LMP1,¤#LMD1,¤#LML1,¤#LMP2,¤#LMD2,
        ¤#LMKL,¤#LMCK,¤#LM2,¤#LMP1PER,¤#LM1PER,¤#LMP2PER,¤#LM2PER,
          ¤#LMP2P,¤#LM2P,MMMH,NP1#,P#,PZ1,PC1,PCM1,PCSM,PMX,PD,
          P2#,PM1,PM2,PSM,P1,P2¤,P1¤,¤#PSI,R1,R2,R1Z,R1Z¤,RCT,RKL,
  R2P,B1P,R2#,R2Z#,R1#,R2##,RK,¤#RM,RZP##,RCTP,R2P#,RKP,¤#RH,¤#R1,SI,
          SP1#,SP1,SKL,SCT,SP2,SPR,SP1##,SH,SM,SR,T1,TCP,T2,¤#T1,
          V,¤#T,W1#,XH,XMZ,X1,X17,X17¤,X2,X2#,X2Z#,X2##,XK,XPER,
          XPOST,XKP,X1#,YP1,ZH,ZK,ZM,Z8,ZKP) FLOAT DEC(16);
 /*  ЧТЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ  */
      GET DATA(P2,F,U1,N1,#2P,H);
      PUT SKIP(3) EDIT('ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ')(X(20),A);
      PUT SKIP(2) EDIT('МОЩНОСТЬ-',P2,'ЧАСТОТА-',F,'НАПРЯЖЕНИЕ-',
      U1,'ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ-',N1,'ЧИСЛО ПОЛЮСОВ-',#2P,
      'ВЫСОТА ОСИ ',H)(X(10),A,F(5,2),X(8),A,F(4),X(8),A,F(4),
      SKIP,A,F(5),X(8),A,F(2),X(8),A,F(3));
 /*  ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТАБЛИЧНЫХ ДАННЫХ =F(H,2P,P2)   */
      ON ERROR GOTO IIIIIN;
      DO IW1=1 TO 4 WHILE(#2P¬=#¬#2P(IW1));
      END; NFLAG=1; IF IW1>4 THEN GOTO ERR1;
      K1=#¬K1(IW1); K2=#¬K2(IW1); A1=#¬A1(IW1); BC1=#¬BC1(IW1);
      KOB1#=#¬KOB1#(IW1); WK2=#¬WK2(IW1); WK3=#¬WK3(IW1);
      DO IW2=1 TO 10 WHILE(H¬= #¬H(IW2));
      END; NFLAG=2; IF IW2>10  THEN GOTO ERR1;
      DH1=#¬DH1(IW2); BP=#¬EB(IW2);   /*1,48*/
      ¤#DLT=#¬¤#DLT(IW1,IW2); Q1=#¬Q1(IW1,IW2); WK1=#¬WK1(IW1,IW2);
      DO IW3=1 TO 16 WHILE(F2¬=#¬P2(IW3));
      END; NFLAG=3; IF IW3>16 THEN GOTO ERR1;
      KPD#=#¬KPD#(IW1,IW3); COSF#=#¬COSF#(IW1,IW3);
      /*  РУЧНОЙ ВВОД   */
      ON ENDFILE(SYSIN) GOTO CONT;
      PUT SKIP(3) EDIT('РУЧНОЙ ВВОД')(X(20),A,SKIP,X(1));
      ¤A1#,¤BDLT#,¤Q1,¤¤#DLT,¤¤#BZ1,¤BZ2=0;
      GET DATA(¤A1#,¤BDLT#,¤Q1,¤¤#DLT,¤¤#BZ1, ¤BZ2) COPY;
)NT;  PUT SKIP EDIT('КОНЕЦ РУЧНОГО ВВОДА')(X(10),A);
      NFLAG=4; IF ¤¤#DLT>50| ¤¤#DLT<-50 THEN GOTO ERR1;
      ¤#DLT=¤#DLT*(1E0+¤¤#DLT*1E-2);
      IF ¤Q1>0 THEN
        DO; NFLAG=5;
        DO  M1=1 TO 10 WHILE(ABS(¤Q1-#¬Q1(IW1,M1))>1E-3);
        END; IF M1>10 THEN GOTO ERR1; Q1=¤Q1;
        END;
 /*  ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ   */
      DO IW5=1 TO 6 WHILE(ABS(Q1-#¬Q1#(IW5))>1E-3);
      END;
      KD1=#¬KD1(IW5);   /*114*/
      D1=DH1*WK2-WK3;/*2*/ ¤#T=PI*D1/#2P; /*2'*/
      CALL DSN91;/*KH-3*/
      P#=KH*P2/COSF#/KPD#*1E3; /*11*/
      Z1=3*#2P*Q1; /*17*/
      DH2=D1-2*¤#DLT; /*20*/
      XW1=.23E0; IF H< 7  THEN XW1=19E-2;
      D2=XW1*DH1; /*21*/
```

```
DO IW4=1 TO 4 WHILE(Z1¬=#¯Z1(IW4));
END; Z2=# Z2(IW1,IW4); /*23*/
Q2=Z2*1E0/(3E0*#2P);  /*23*/
¤#ALF=60E0/Q1; /* В ГРАДУСАХ- 24 */
KOB1,KP1=5E-1/Q1/SIND(¤#ALF/2E0); /* 25,27*/
YP1=Z1*1E0/#2P; /* 26*/
I1=P2*1E3/(3E0*U1*KPD#*COSF#); /*36*/
T1=PI*D1/Z1;  /*39*/
¤#BZ1=1.85E0; NFLAG=6; IF ABS(¤¤#BZ1)>25 THEN GOTO ERR1;
¤#BZ1=¤#BZ1*(1E0+¤¤#BZ1*1E2); /*40*/
BZ2=1.7E0; NFLAG=7; IF ABS(¤BZ2)>25 THEN GOTO ERR1;
BZ2=BZ2*(1E0+¤BZ2*1E-2); /*74*/
BC,HC=1E-1; /*42*/
HCH1=5E-1; /*46*/
BCH1=#¯BCH1(IW1,IW2); /*47*/
K5=1E0; IF #2P=2 THEN K5=78E-2; /*62*/
¤#ALFCK=#2P*PI*¤#BCK/Z1; /*124*/
CALL DSNGRP1; /*A1#,BCLT#,A1J1,HP2,KD2,KCK*/
NFLAG=8; IF ¤A1#¬=0 & ¤BDLT#¬=0 THEN DO; PUT SKIP EDIT(
 ИЗ ВЕЛИЧИН ¤A1# И ¤BCLT# ПРИНИМАЕТСЯ ВО ВНИМАНИЕ',
  ТОЛЬКО ¤A1#')(X(10),A,A); ¤BDLT#=0; END;
 IF ABS(¤A1#)>25 | ABS(¤BDLT#)>25 THEN GOTO ERR1;
XW1=A1#*BDLT#;
A1#=A1#*(1E0+¤A1#*1E-2); BDLT#=BDLT#*(1E0+¤BDLT#*1E-2);
IF ¤A1#=0 THEN A1#=XW1/BDLT#; ELSE BDLT#=XW1/A1#; /* 7,8*/
HC2=WK1*DH2-HP2; /*71*/
XW1=Z2/#2P*2;
DO IW6=1 TO 8 WHILE (ABS(XW1-#¯Z2P(IW6))>1E-3);
END; KP1=#¯KP1(IW5,IW6); /*113*/
L1#=8.62E7*P#/(D1**2*N1*A1#*BDLT#*KOB1#); /*12*/
IT1:  L2,L1=L1#+5E-1; IF L1>100 THEN DO; L1=L1#/5+5E-1;
                              L1,L2=5*L1; END;/*13,22*/
¤#LM1=L1/D1; /*14*/
¤#F#=BDLT#*D1*L1#*2E-6/#2P; /*28*/
W1#=KH*U1/(222E0*KOB1*¤#F#*F )*5E1; /*29*/
NP1#=W1#*A1/#2P/Q1*2E0;/*31*/
NP1=NP1#+5E-1;/*32*/
W1=NP1*#2P*Q1/(A1+A1);/*33*/
¤#F=¤#F#*W1#/W1; /*34*/
BDLT=BDLT#*W1#/W1;/*35*/
¤#A1=1E1*NP1*Z1*J1/(PI*D1*A1);/*37*/
BZ1=T1*BDLT/KC/¤#BZ1;/*41*/
HC1=¤#F*1E6/(2E0*KC*L1*BC1);/*43*/
HP1=(DH1-D1)/2E0-HC1;/*44*/
B1=PI*(D1+HP1+HP1)/Z1-BZ1;/*45*/
B2=(PI*(D1-HCH1-HCH1-BCH1)-71*BZ1)/(Z1-PI);/*49*/
SP1=(B1+B2)/2E0*(HP1-HCH1-(B2-BCH1)/2E0);/*50*/
SP1#=((B1+B2)/2E0-BC)*(HP1-HCH1-HC-(B2-BCH1)/2E0);/*51*/
SI=BP*(HP1+HP1+B1+B2);/*52*/
SPR=B1/2E0+ 75E0*B2;/*53*/
SP1##=SP1#-S1-SPR;/*54*/
V=KP#*SP1##/NP1;/*56*/
C=V/1.77E0;  /*57*/
D#,D##=SQRT(V/O);/*58*/
CALL DSNGRP2;/* D,S-59*/
KP=NP1*C*O#**2/SP.##;/*60*/
J1=I1/(C*S*A1);/*61*/
XW1=¤#A1*J1/(K5*A1J1); IF XW1>=1.15E0 THEN
DO; L1#=L1#+XW1; GOTO IT1; END;/*64*/
```

```
TCP=PI*(D1+HP1)/Z1;/*65*/
BCP1=TCP*YP1;/*66*/
LL1=(1.16E0 +7E-2*#2P)*BCP1+15E0;/*67*/
LCP1=2E0*(L1+LL1);/*68*/
WK4=.19E0; WK5=1E-1; IF IW2=10 THEN DO; WK4=.12E0;
WK5=.15E0;END; LB1=BCP1*(WK4+WK5*#2P/2E0)+1E1;/*69*/
¤#BC2=¤#F*1E6/(2E0*KC*L2*HC2);/*72*/
T2=PI*DH2/Z2;/*73*/
¤#BZ2=T2/BZ2*BDLT/KC;/*75*/
HCH=6E-1; BCH=12E-1;/*76,77*/
B2P=(PI*(DH2-HP2-HP2)-Z2*¤#BZ2)/2E0/(Z2-PI);/*78*/
B1P=(PI*(DH2-HCH)-Z2*¤#BZ2)/(2E0*(Z2+PI));/*79*/
H1=HP2-HCH-R1P-R2P;/*80*/
SCT,SP2=PI/2*(R1P**2+R2P**2)+H1*(R1P+R2P);/*81*/
SKL=.4E0*Z2*SCT/#2P;/*82*/
HKL=115E-2*HP2;/*83*/
LKL=SKL/HKL;/*84*/
DKLCP=DH2 HKL;/*85*/
K¤#DLT1=1E0+BCH1/(T1-BCH1+5E0*¤#DLT*T1/BCH1);/*86*/
K¤#DLT2=1E0+BCH /(T2-BCH +5E0*¤#DLT*T2/BCH );/*87*/
K¤#DLT=K¤#DLT1*K¤#DLT2;/*88*/
F¤#DLT=8E2*¤#DLT*BDLT*K¤#DLT;/*89*/
CALL DSNGRP3; /*90,92,95,98- HZ1,HZ2,¤#HC1,¤#HC2*/
FZ1=1E-1*HZ1*HP1;/*91*/
LZ2=HP2-2E-1*R2P;/*93*/
FZ2=1E-1*HZ2*LZ2;/*94*/
¤#LC1=PI/2E0*(DH1-HC1)/#2P;/*96*/
¤#FC1=1E-1*¤#HC1*¤#LC1;/*97*/
IF #2P=2 THEN ¤#LC2=HC2; ELSE ¤#LC2=PI*(D2+HC2)/2E0/#2P;/*99*/
¤#FC2=¤#HC2*¤#LC2*1E-1;/*100*/
FSM=F¤#DLT+FZ1+FZ2+¤#FC1+¤#FC2;/*101*/
KHAC=FSM/F¤#DLT;/*102*/
IM=2.22E0*FSM*#2P/6E0/W1/KOB1;/*103*/
IMZ=IM/I1;/*104*/
E=KH*U1;/*105*/ XM=E/IM;/*106*/ XMZ=XM*I1/U1;/*107*/
R1=W1*LCP1/(57E3*A1*C*S);/*108*/ R1Z=R1*I1/U1;/*109*/
R1Z¤=PI*D1*¤#A1*J1*LCP1/(342E4*U1*I1);/*110*/
IF ABS(R1Z-R1Z¤)>EPSR*R1Z*1E-2 THEN GOTO ERR2;
¤#LMP1=H1/3E0/B2+3E0*HK/(B2+BCH1+BCH1)+HCH1/BCH1+H2/B2;/*111*/
KCH1=1E0-3.3E-2*BCH1/(T1*¤#DLT);/*112*/
¤#LMD1=9E-1*(T1*KOB1)*(T1*KOB1)*KP1*KCH1*KD1/¤#DLT/K¤#DLT;/*115*/
¤#LML1=3.4E-1*Q1/L1*(LL1-6.4E-1*¤#B*¤#T); /*116*/
¤#LM1=¤#LMP1+¤#LMD1+¤#LML1;/*117*/
X1=1.58E-8*F*L1*W1*W1/(#2P*Q1)*¤#LM1*2E0;/*118*/
X1Z=X1*I1/U1;/*119*/
X1Z¤=1.3E 8*D1*¤#A1*D1*¤#A1*L1*¤#LM1/(U1*I1*Z1);/*120*/
IF ABS(X1Z-X1Z¤)>EPSX*X1Z*1E-2 THEN GOTO ERR3;
RCT=L2/27E3/SCT;/*121*/
KPR2=2E0*SIN (PI*#2P/Z2/2E0);/*122*/
RKL=PI*DKLCP/(13.5E3*Z2*SKL*KPR2*KPR2);/*123*/
KPR1=12E0/Z2*(W1*KOB1/KCK)**2;/*126*/
R2#=KPR1*(RCT+RKL);/*127*/
R2Z#=R2#*I1/U1;/*128*/
I2=4E2*W1*KOB1*P2*(1E0+4E0*COSF#)/KPD#/COSF#/U1/Z2;/*129*/
¤#LMP2=HCH/BCH+(H1+8E-1*R2P)/6E0/R1P*(1E0-PI*R1P**2/2E0/SCT)**2+
      6.6E-1 BCH/4E0/R1P;/*130*/
¤#LMD2=.9E0*T2*KD2/¤#DLT/K¤#DLT*(Z2/3E0/#2P)**2;/*132*/
¤#LMKL=2.3E0*DKLCP/Z2/L2/KPR2/KPR2*LOG10(2.35E0*DKLCP/
      (HKL+LKL));/*133*/
```

```
¤#BCK2=¤#BCK*T1/T2;/*134*/
¤#LMCK=T2*¤#BCK2/9.5E0/¤#DLT/K¤#DLT/KHAC;/*135*/
¤#LM2=¤#LMP2+¤#LMD2+¤#LMKL+¤#LMCK;/*136*/
X2=79E-10*F *L2*¤#LM2;/*137*/
X2#=KPR1*X2;/*138*/
X2Z#=X2#*I1/U1;/*139*/
¤#T1=X1/XM;/*140*/
¤#R1=R1*MT/(X1+XM);/*141*/
R1#=MT*R1;/*142*/
X1#=X1*(1E0+¤#T1)*(1E0+R1*¤#R1/X1);/*143*/
R2##=MT*R2#*(1E0+¤#T1)**2*(1E0+¤#R1*¤#R1);/*144*/
X2##=R2##/MT/R2#*X2#;/*145*/
GZ1#=7.8E 6*Z1*BZ1*HP1*L1*KC;/*146*/
GC1=7.8E0*P1*(DH1-HC1)*HC1*L1*KC*1E-6;/*147*/
PZ1=4.4E0*¤#BZ1**2*GZ1#;/*148*/
PC1=4.4E0*BC1*BC1*GC1;/*149*/
ICP=U1/(XM*(1E0+¤#T1)*(1E0+¤#R1**2));/*150*/
PCM1=3E0*ICP*ICP*R1#*(1E0+¤#R1**2);/*151*/
PCSM=PZ1*(1E0+2E0*SQRT(T1/1E1*(K¤#DLT-1E0)**2))+PC1;/*152*/
KMX=1E0; IF #2P=2 THEN KMX=1.3E0*(1E0-DH1/1E3);
PMX=KMX*N1**2*DH1**4*1E-14;/*153*/
IOA=(PCM1+PCSM+PMX)/3E0/U1;/*154*/
IO=SQRT(IOA**2+ICP**2);/*155*/
COSFO=IOA/IO;/*156*/
RK=R1#+R2##;/*157*/
XK=X1#+X2##; /*158*/ ZK=SQRT(RK*RK+XK*XK);/*159*/
PD=5E0*P2/KPD#;/*160*/
P2#=P2*1E3+PMX+PD;/*161*/
¤#RH=1.5E0*U1*U1/P2#-RK+SQRT((1.5E0*U1*U1/P2#-RK)**2-ZK*ZK);/*162*/
ZH=SQRT(XK*XK+(¤#RH+RK)**2);/*163*/
SH=1E0/(1E0+¤#RH/R2##);/*164*/
ICA=(PCM1+PCSM)/(3E0*U1);/*165*/
I2##=U1/ZH;/*166*/
IR1=ICP+I2##*(XK/ZH*(1E0-¤#R1**2)/(1E0+¤#R1**2)-(¤#RH+RK)/ZH*
     2E0*¤#R1/(1E0+¤#R1**2));/*167*/
IA1=ICA+I2##*((¤#RH+RK)/ZH*(1E0-¤#R1**2)/(1E0+¤#R1**2)-XK/ZH*
     2E0*¤#R1/(1E0+¤#R1**2));/*167*/
I1=SQRT(IA1**2+IR1**2);/*168*/
COSF=IA1/I1;/*169*/
¤#A1=1E1*I1*NP1/A1/T1;/*170*/
J1=I1/C/S/A1;/*171*/
¤#A2=¤#A1/I1/KCK*I2##*(1E0+¤#T1)*KOB1*SQRT(1E0+¤#R1**2);/*172*/
ICT=I2##*6E0*W1*KOB1/Z2/KCK*(1E0+¤#T1)*SQRT(1E0+¤#R1**2);/*173*/
JCT2=ICT/SCT;/*174*/ IKL=ICT/KPR2;/*175*/
PM1=3E0*I1**2*R1#;/*176*/ PM2=3E0*I2##**2*R2##;/*177*/
PSM=PM1+PM2+PCSM+PMX+PD;/*178*/ P1=P2*1E3+PSM;/*179*/
KPD=(1E0-PSM/P1)*1E2;/*180*/
P1¤=3E0*IA1*U1;/*181*/ IF ABS(P1-P1¤)>P1*EPSP1*1E-2THEN GOTO ERR4;
P2¤=3E0*I1*U1*KPD*1E-2*COSF;/*128*/
IF ABS(P2*1E3-P2¤)>P2*EPSP2*1E1 THEN GOTO ERR5;
¤#LMP1PER-(3E0*HK/(B2+2E0*BCH1)+HCH1/BCH1)*K¤#B#;/*183*/
¤#LM1PER=¤#LMP1PER+¤#LMD1;/*184*/
¤#LMP2PER-HCH/BCH;/*185*/
¤#LM2PER=¤#LMP2PER+¤#LMD2;/*186*/
XPER=X1#*¤#LM1PER/¤#LM1+X2##*¤#LM2PER/¤#LM2;/*187*/
XPOST=X1#*(¤#LM1-¤#LM1PER)/¤#LM1+X2##*(¤#LM2-¤#LM2PER)/¤#LM2; /*188*/
WWW=XPOST+8 25E-2*XPER;WWW1=R1#**2+WWW**2+R1#*WWW;
IM2##=U1/SQRT(2E0*WWW1) 6.2E2*¤#DLT*A1*XPER*(R1# +WWW+WWW)/NP1/WWW1;
/*189*/ ZM=U1/IM2##;/*190*/
```

```
Z8=(SQRT(R1#**2+2E0*ZM**2)-R1#**2)*5E-1;/*191*/
Ø#RM=Z8+R1#;/*192*/
MMMH=1.5E 3*U1**2*(1E0-SH)/Ø#RM/P2;/*193*/ SM=R2##/Z8;/*194*/
HCT=HP2-HCH;/*195*/ Ø#DZ=6.65E-2*HCT ;/*196*/
CALL DSNGRP4; /* Ø#FI,Ø#PSI- 197,204*/
HR=HCT/(1E0+Ø#FI);/*198*/
IF HR<R1P THEN BR=2E0*SQRT(R1P**2-(R1P-HR)**2);
ELSE BR=R1P+R1P-2E0*(R1P-R2P)*(HR-R1P)/H1;/*199*/
IF HR<R1P THEN
   SR=(R1P*(SQRT(BR**2+5.33E0*HR**2)-BR)+BR*HR)/2E0;
ELSE SR=PI/2E0*R1P**2+(R1P+BR/2E0)*(HR-R1P);/*200*/
KBT=SCT/SR;/*201*/ RCTP=RCT*KBT;/*202*/
R2P#=KPR1*(RCTP+RKL);/*203*/
Ø#LMP2P=HCH/BCH+Ø#PSI*(.66E0-BCH/4E0/R1P+(H1+.8E0*R2)/R1P/6F0*
      (1E0-PI*R1P**2/2E0/SCT)**2);/*205*/
Ø#LM2P=Ø#LMP2P+Ø#LMD2+Ø#LMKL+Ø#LMCK;/*206*/
XPER=X1#*Ø#LM1PER/Ø#LM1+X2##*Ø#LM2PER/Ø#LM2P;/*207*/
XPOST=X1#*(Ø#LM1-Ø#LM1PER)/Ø#LM1+X2##*(Ø#LM2P-Ø#LM2PER)/Ø#LM2P;/*208*/
WWW=XPOST+.825E-2*XPER; WWW1=RKP**2+WWW**2;
IP2##=U1/SQRT(WWW1)-1.24E3*Ø#DLT*A1*XPER*WWW/NP1/WWW1;/*210*/
ZKP=U1/IP2##;/*211*/ XKP=SQRT(ZKP**2-RKP**2);/*212*/
WWW=1E0+Ø#R1**2; WWW1=(1E0-Ø#R1**2)/WWW;
IPA1=ICA+IP2##*(RKP/ZKP*WWW1+XKP/ZKP*2E0*Ø#R1/WWW);/*213*/
IPR1=ICP+IP2##*(XKP/ZKP*WWW1-RKP/ZKF*2E0*Ø#R1/WWW);/*214*/
IP1=SQRT(IPA1**2+IPR1**2);/*215*/ KIP=IP1/I1;/*216*/
R2P##=R2P#*1.22E0*(1E0+Ø#T1)**2*WWW;/*217*/
KMP=3E-3*IP2##**2*R2P#*    *(1E0-SH)/P2;/*218*/
            /* ПЕЧАТЬ  */
PUT SKIP EDIT('РАСЧЕТ ЗАКОНЧЕН')(A);IIIIIN;  CALL PRINT;
  RETURN;
ERR2:  PUT SKIP EDIT('******** НЕСРАВНЕНИЕ R1Z И R1ZØ')(A); CALL PRINT;
       RETURN;
ERR3:  PUT SKIP EDIT('******** НЕСРАВНЕНИЕ X1Z И X1ZØ')(A); CALL PRINT;
       RETURN;
ERR4;  PUT SKIP EDIT('******** НЕСРАВНЕНИЕ P1  И P1Ø ')(A); CALL PRINT;
       RETURN;
ERR5;  PUT SKIP EDIT('******** НЕСРАВНЕНИЕ P2  И P2Ø ')(A); CALL PRINT;
       RETURN;
ERR1:;  DCL EMSG1 CHAR(61) INIT('ОШИБКА В ЗАДАНИИ ПАРАМЕТРА ИСХОДНЫХ ДА
ННЫХ ИЛИ РУЧНОГО ВВОДА-')STATIC,
         EMG CHAR(13) STATIC,
         PICMSG(8) CHAR(13) STATIC INIT('#2P','H','P2','Ø#DLT','Q1',
           'BZ1','BZ2','A1# ИЛИ BDLT# ');
       EMG=PICMSG(NFLAG); PUT SKIP(2) EDIT(EMSG1,EMG)(X(10),A,A);
       RETURN;
DSNGRP1: PROC;
         BDLT#=5.3326E-1+DH1*4.2611E-3-DH1*DH1*1.8406E-5+DH1**3*
              2.8132E-8;
         DCL IW,KF1(3,4) FLOAT DEC STATIC INIT(.23215E0,.11724E0,
              6.8694E-5,-1.3258E-7,-2.1937E0,1.7638E-1,-4.7664E-4,
              9.7483E-7,-3.3765E-1,1.1197E-1,-4.964E-5,8.3985E-8);
         IF #2P=2 THEN IW=3;ELSE IF #2P=4 THEN IW=2;ELSE IW=1; .
         HP2=KF1(IW,1)+KF1(IW,2)*DH1+KF1(IW,3)*DH1*DH1+KF1(IW,4)*
              DH1**3;-
         KD2=1E-1/Q2**2.016E0;
      KCK=1.0002E0+Ø#ALFCK*3.2517E-3-Ø#ALFCK**2*4.627E-2+Ø#ALFCK**3*
              2.331E-3;
        A1#=-7.3843E1+DH1*3.3821E0-DH1**2*1.2541E-2+DH1**3*
              1.7275E-5;
```

```
          A1J1=999.44E0+DH1*4 556E0-DH1**2*9.0504E-3+DH1**3*2.427E-7;
        END DSNGRP1;
DSNGRP4; PROC;
          ¤#FI=-1.5432E0+¤#DZ*(5.6798E0=¤#DZ*(8.017E0-¤#DZ*(5.5599F0·
              ¤#DZ*(1.9059E0-¤#DZ*(3.3592E-1-¤#DZ*(2.7441E-2-¤#DZ*
              6.8283E-4)))))));
      ¤#PSI=1.0011E0+¤#DZ*(-1.3762E-1+¤#DZ*(4.7232E-1+¤#DZ*(-6.1933E-1
              +¤#DZ*(3.0675E-1+¤#DZ*(-7.3801E-2+¤#DZ*(8.6766E-3-
              ¤#DZ*3.9742E-4)))))));
        END DSNGRP4;
DSNGRP2  PROC;
          D=-3.3756E-2+D#*(1.0444E0+D#*(1.9191E-1+D#*(1.422E-1-D#*
            3.259E-2)));
          S=-8.9361E-2+D#*(6.5959E-1+D#*(-1.1476E0+D#*(2.0595E0+
            D#*( 5.0598E 1+D#*(-7.949E-1+D#*(6.3396E-1-D#*1.3578E-1
            )))))));
        END DSNGRP2;
DSN91:  PROC;
          DCL KF3(5,2) FLOAT DEC STATIC INIT(.9706,7.3E-3,.9756,
              4.8E 3,.9586,1.32E-2,.9424,.0224,.9148,.0332);
          IF #2P-2 THEN
            IF P2<.9E0 THEN I=1;ELSE I=2;
          ELSE IF #2P=4 THEN I=3;
          IF #2P-6 THEN I=4; IF #2P=8 THEN I=5;
          KH=KF3(I,1)+KF3(I,2)*LOG10(P2);
        END DSN91;
.GRP3S1:  PROC(PARM,PB);
          DCL (PARM, WW(5),PB) DEC(16),
              (WINT(5) INIT(3.8,3.2,2.6,1.8,1),
               BH14(3)  INIT(4.55,2.9E-3,4.55),
               H14¯1(8,2) INIT(1.8,1.8,1.9,1.911,2,2.01,2.1,2.1,
                          2.2,2.22,2.3,2.323,2.4,2.406,2.45,2.449),
               H14¯2(8,2) INIT(1.8,1.8,1.9,1.911,2,2.01,2.1,2.11,
                          2.2,2.231,2.3,2.334,2.4,2.416,2.42,2.436),
               H14¯3(7,2) INIT(1.8,1.8,1.9,1.923,2,2.02,2.1,2.115,
                          2.2,2.24,2.3,2.34,2.4,2.432),
               H14¯4(7,2) INIT(1.8,1.8,1.9,1.923,2,2.033,2.1,2.13,
                          2.2,2.24,2.3,2.35,2.4,2.447),
               H14¯5(7,2) INIT(1.8,1.8,1.9,1.935,2,2.033,2.1,2.13,
                          2.2,2.26,2.3,2.366,2,35,2.416))STATIC;
          DO I=1 TO 3 WHILE (PARM<WINT(I+1)); END;
          CALL LINE(H14¯1,PB,WW(1));
          CALL LINE(H14¯2,PB,WW(2));
          CALL LINE(H14¯3,PB,WW(3));
          CALL LINE(H14¯4,PB,WW(4));
          CALL LINE(H.4¯5,PB,WW(5));
          WW(I)=BH14(1)+BH14(2)*EXP(BH14(3)*WW(I));
          WW(I+1)=BH14(1)+BH14(2)*FXP(BH14(3)*WW(I+1));
          PARM=WW(I)+(WW(I+1)-WW(I))/(WINT(I+1)-WINT(I))*
              (PB-WINT(I));
        END GRP3S1;
DSNGRP3; PROC;
          DCL (WT1,WKZ) FLOAT DEC(16),
              C2 FIXED BIN INIT(2);
        /* HZ1,HZ2 */
          IF ¤#BZ1<=1.8E0 THEN CALL HB8#¯5#¯11(C2,¤#BZ1,HZ1);
          ELSE DO; WT1=PI/Z1*(D1+HP1*2E0/3E0); WKZ=WT1/BZ1/KC;
              CALL GRP3S1(WKZ,¤#BZ1);
              HZ1=WKZ;
```

```
            END;
          IF BZ2<=1.8E0 THEN CALL HB8#¯5#¯11(C2,BZ2,HZ2);
          ELSE DO; WT1=PI/Z2*(DH2-HP2*4E0/3E0); WKZ=WT1/¤#BZ2/KC;
                   CALL GRP3S(WKZ,BZ2); HZ2=WKZ;
             END;
       /*  ¤#HC1,¤#HC2=F(BC1,¤#BC2) */
          IF #2P-2 BC1>1.4E0 THEN C2=1; ELSE C2=3;
          CALL HB8#¯5#¯11(C2,BC1,¤#HC1);
          IF #2P-2 THEN C2=3; ELSE C2=1;
          CALL HB8#¯5#¯11(C2,¤#BC2,¤#HC2);
        END DSNCRP3;
 LINE:  PROC(A,X,Y);
          DCL A(*,*) FLOAT DEC,
              (X,Y)   DEC(16);
          LX1=LBOUND(A ,1); HX1=HBOUND(A ,1); LX2=LBOUND(A,2);
          DO J=1 TO HX1-LX1-1 WHILE(X>A(LX1+J,LX2));
          END;
          Y=(A(LX1+J ,LX2+1)-A(LX1+J-1 ,LX2+1))/
            (A(LX1+J,LX2)-A(LX1+J-1,LX2))*(X-A(LX1+J-1,LX2))+
            A(LX1+J-1,LX2+1);
        END LINE;
HB8#¯5#¯11: PROC(IP,X,Y);
          DCL (X,Y) DEC(16);
          DCL (B5(9,2)INIT(.86,.8968,1,1,1.2,1.1025,1.4,1.29485,
              1.6,1.6054,1.8,1.8023,2,1.991,2.2,2.2074,2.4,2.397),
              B8(9,2)INIT(.4,.0137,.5,.5,.6,.722,.8,.96,1,1.103,
              1.2,1.246,1.4,1.4,1.6,1.563,1.8,1.8),
              B11(11,2)INIT(.44,.165,.46,.458,.6,.845,.8,1.06,
               1,1.194,1.2,1.29,1.4,1.4,1.6,1.548,1.8,1.766,2,2,
                 2.08,2.088),
              BH5(3) INIT(.773,4.88E-4,6.5072),
              BH8(3) INIT(1.131,.105,2.72),
              BH11(3)INIT(.55,4.59E-3,4.73)) STATIC FLOAT DEC;
        IF IP=1 THEN DO; CALL LINE(B5,X,Y);
                         Y=BH5(1)+BH5(2)*EXP(BH5(3)*Y); END;
        ELSE IF IP=2 THEN DO; CALL LINE(B8,X,Y);
                         Y=BH8(1)+BH8(2)*EXP(BH8(3)*Y); END;
             ELSE DO; CALL LINE(B11,X,Y);
                         Y=BH11(1)+BH11(2)*EXP(BH11(3)*Y); END;
    END HB8#¯5#¯11;
PRINT:  PROC;
         PUT PAGE EDIT('РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ')(X(30),A);
      PUT SKIP(3) DATA(¤#ALF,¤#ALFCK,¤#A1,¤#A2,¤#B,¤#BCK,¤#BCK2,¤#BC2,
   ¤#BZ1,¤#BZ2,¤#DLT,¤#DZ,¤#F,¤#F#,¤#FC1,¤#FC2,¤#FI,¤#HC1,¤#HC2,¤#LC1,
    ¤#LC2,¤#LMCK,¤#LMD1,¤#LMD2,¤#LMKL,¤#LML1,¤#LMP1,¤#LMP1PER,¤#LMP2,
  ¤#LMP2P,¤#LMP2PER,¤#LM1,¤#LM1PER,¤#LM2,¤#LM2P,¤#LM2PER,¤#PSI,¤#RH,
  ¤#RM,¤#R1,¤#T,¤#T1,A,A1,A1#,A1J1,B,BC,BCH,BCH1,BCP1,BC1,BDLT,BDLT#,
          BP,BR,BZ1,BZ2,B1,B2,C,COSF,COSF#,CCSFO,D,D#,D##,DH1,DH2,
          DKLCP,D1,D2,E,F¤#DLT,FSM,FZ1,FZ2,GC1,GZ1#,HC,HCH,HCH1,HCT,
          HC1,HC2,HK,HKL,HP1,HP2,HR,HZ1,HZ2,H1,H2,IA1,ICA,ICP,ICT,IKL,
          IM,IMZ,IM2##,IQ,IOA,IPA1,IPR1,IP1,IP2##,IR1,I1,I2,
        I2##,JCT2,J1,K¤#B#,K¤#CLT,K¤#DLT1,K¤#DLT2,KBT,KC,KCH1,KCK,KD1,
          KD2,KH,KHAC,KIP,KMP,KMX,KOB1,KOB1#,KP,KP#,KPD,
          KPD#,KPR1,KPR2,KP1,K1,K2,K5,LB1,LCP1,LKL,LL1,LZ2,L1,
          L1#,L2,MMMH,MT,NP1,NP1#,P#,PCM1,PCSM,PCL,PC,PMX,PM1,PM2,
      PSM,PZ1,P1,P1¤,P2,P2¤,P2#,Q1,Q2,RCT,RCTP,RK,RKL,RKP,R1,R1#,R1P,
      R1Z,R1Z¤,R2,R2#,R2##,R2P,R2P#,R2P##,R2Z#,S,SCT,SH,SI,SKL,SM,SPR,
          SP1,SP1#,SP1##,SP2,SR,TCP,T1,T2,V,W1,W1#,XK,XKP,XM,XMZ,
              X1,X1#,X1Z,X1Z¤,X2,X2#,X2##,X2Z#,YP1,ZH,ZK,ZKP,ZM,Z1,

          Z2,Z8);
   END PRINT; END PROF;
```

Глава 10
РАСЧЕТ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 10-1. Единые серии машин постоянного тока

Общие сведения. Двигатели постоянного тока применяют в электроприводах, требующих широкого, плавного и экономичного регулирования частоты вращения, высоких перегрузочных пусковых и тормозных моментов, главным образом в металлообрабатывающих станках, бумагоделательных машинах, в текстильной, резиновой, полиграфической промышленности, вспомогательных механизмах металлургической промышленности и др.

Конструкция двигателей постоянного тока сложнее и стоимость их выше, чем асинхронных двигателей, однако благодаря указанным свойствам удельный вес их в общем выпуске электрических машин не снижается, а наоборот, имеет тенденцию к повышению. Особенно эта тенденция проявляется в течение последних десятилетий в связи с развитием и широким внедрением автоматизированного привода, а также с освоением тиристорных устройств, создающих возможность питания двигателей постоянного тока от сети переменного тока. Вместе с тем развитие статических преобразователей влечет за собой соответствующее сокращение выпуска генераторов постоянного тока. Разработанная в СССР и внедренная в производство взамен устаревшей серии П новая единая серия подразделяется на два основных ряда: серию 2П с $h=90\div315$ мм (мощностью до 200 кВт при 1500 об/мин) и серию П2 с $h=355\div630$ мм (мощностью свыше 200 кВт).

Серия 2П. Серия охватывает следующие исполнения по степени защиты от внешних воздействий и по способу охлаждения: защищенное исполнение (IP22) с самовентиляцией (IC01) при $h=90\div315$ мм; защищенное исполнение (IP22) с независимой вентиляцией от пристроенного электровентилятора (IC06) при $h=132\div200$ мм; закрытое исполнение (IP44) с наружным обдувом от пристроенного электровентилятора (IC0641) при $h=132\div200$ мм; закрытое исполнение (IP44) с естественным охлаждением (IC0041) при $h=90\div200$ мм.

Двигатели со степенью защиты IP22 допускают регулирование частоты вращения ослаблением поля главных полюсов вверх от номинальной (при постоянной мощности на валу) в пределах **от 1:1,15 до 1:4 в зависимости от** величины типоразмера и номинальной частоты вращения. Двигатели с независимой вентиляцией допускают регулирование частоты вращения вниз от номинальной до трех оборотов в минуту при постоянном моменте вращения на валу; у остальных двигателей при регулировании частоты вращения вниз момент вращения должен снижаться во избежание недопустимого превышения температуры.

Двигатели имеют массивную станину, допускают работу при питании от статических преобразователей. В зависимости от схемы выпрямления номинальная мощность и диапазон регулирования частоты вращения могут снижаться. Двигатели изготовляют

на номинальные напряжения: 110 и 220 В (при мощности до 7,5 кВт), 220 и 440 В (при мощности более 7,5 кВт), генераторы — на 115, 230 В (при мощности до 7,5 кВт), 230, 460 В (при мощности более 7,5 кВт).

Машины со степенью защиты IP22 при $h=90\div200$ мм выполняются с изоляцией класса нагревостойкости B; все остальные машины — с изоляцией класса F. Общие технические условия на машины серии 2П регламентированы ГОСТ 20529—75.

Серия П2. Двигатели этой серии защищенного исполнения (IP23) с независимым охлаждением, осуществляемым пристроенным зависимым (IC13) или независимым (IC17) устройством, а генераторы защищенного исполнения (IP23) с самовентиляцией (IC01) или с независимым охлаждением IC13.

Двигатели допускают регулирование частоты вращения ослаблением поля главных полюсов вверх от номинальной (при постоянной мощности на валу) в пределах от 1 : 1,1 до 1 : 5, в зависимости от величины типоразмера и номинальной частоты вращения, и вниз от номинальной (при постоянном моменте вращения на валу). Двигатели имеют два исполнения: с массивной или шихтованной станиной; последняя обеспечивает работу двигателей без снижения номинальной мощности при питании от статических преобразователей. Машины этой серии предназначены для работы в относительно тяжелых условиях при больших перегрузочных, пусковых и тормозных моментах, поэтому выполняются с компенсационной обмоткой.

Двигатели изготовляются на номинальные напряжения: 440 В (при мощности до 500 кВт включительно), 600 В (при большей мощности); генераторы на номинальные напряжения: 460 В (до 500 кВт включительно), на 660 В (при большей мощности).

Машины выполняют с изоляцией класса нагревостойкости F. Технические условия на двигатели серии П2 регламентированы ГОСТ 23437—79.

Серия П. Наряду с новой единой серией частично изготовляются машины серии П мощностью от 0,3 до 200 кВт с высотами оси вращения $h=112\div400$ мм. В серии П предусмотрены следующие исполнения по степени защиты и способу охлаждения: защищенное исполнение (IP22) с самовентиляцией (IC01) при $h=112\div400$ мм; закрытое исполнение (IP44) с наружным обдувом от вентилятора, расположенного на валу двигателя (IC0141) при $h=112\div160$ мм; закрытое исполнение (IP44) с пристроенным воздухо-воздушным охладителем (IC0161) при $h=180\div400$ мм; закрытое исполнение (IP44) с естественным охлаждением (IC0041) при $h=112\div280$ мм.

Генераторы исполняются защищенными (IP22) с самовентиляцией (IC01) при $h=140\div400$ мм.

Двигатели выполняются на номинальные напряжения: 110 В (при мощности до 55 кВт включительно), 220 В (во всем диапазоне мощностей) и 440 В (при мощности 1,5 кВт и выше); генераторы — на номинальные напряжения: 115 В (при мощности до

90 кВт включительно), 230 В (во всем диапазоне мощностей) и 460 В (при мощности 2,8 кВт и выше). Машины со степенью защиты IP22 выполняются с изоляцией класса нагревостойкости В (при h=112÷225 мм); остальные машины — с классом F. Станины в машинах серии П монолитные.

§ 10-2. Исходные данные для проектирования

Для проектирования машин постоянного тока должны быть заданы следующие исходные данные: 1. Назначение — двигатель или генератор. 2. Номинальный режим работы по ГОСТ 183—74. 3. Номинальная отдаваемая мощность по ГОСТ 12139—74. 4. Номинальное напряжение по ГОСТ 21128—75. 5. Номинальная частота вращения по ГОСТ 10683—73. 6. Предел регулирования частоты вращения двигателя вверх от номинальной ослаблением поля главных полюсов. 7. Предел регулирования частоты вращения двигателя вниз от номинальной изменением напряжения на якоре. 8. Кратковременная перегрузка по току по ГОСТ 183—74. 9. Род возбуждения. 10. Напряжение независимого возбуждения. 11. Наличие или отсутствие компенсационной обмотки. 12. Источник и условия питания (для двигателей). 13. Степень защиты от внешних воздействий по СТ СЭВ 247—76. 14. Способ охлаждения по ГОСТ 20459—75. 15. Исполнение по способу монтажа по СТ СЭВ 246—76. 16. Климатические условия и категория размещения по ГОСТ 15150—69 и 15543—70. 17. Форма выступающего конца вала. 18. Способ соединения с приводимым механизмом (для двигателя) или приводным двигателем (для генератора).

Кроме того, дополнительными общими требованиями являются: применение высоты оси вращения по ГОСТ 13267—73, установочно-присоединительных размеров по ГОСТ 18709—73 или 20839—75; обеспечение показателей надежности и долговечности по ГОСТ 20529—75.

Содержание предписаний перечисленных стандартов приведено в § 1-2. Во всем неоговоренном в исходных данных машины должны удовлетворять требованиям ГОСТ 183—74.

Примеры расчета машин

1. Исходные данные для проектирования

Наименование заданных параметров и их условные обозначения	Двигатель № 1	Двигатель № 2
Номинальный режим работы	Продолжительный ($S1$)	
Номинальная отдаваемая мощность P_2, кВт	5,5	75
Номинальное напряжение U, В	220	220
Номинальная частота вращения n, об/мин	1500	1000
Предел регулирования частоты вращения вверх от номинальной ослаблением поля главных полюсов n_{max}, об/мин	3000	2000

Продолжение

Наименование заданных параметров и их условные обозначения	Двигатель № 1	Двигатель № 2
То же, вниз от номинальной изменением напряжения на якоре n_{min}, об/мин	500	300
Кратковременная перегрузка по току $I_{max}/I_н$	1,5	1,5
Род возбуждения	Параллельное со стабилизирующей последовательной обмоткой	
Источник и условия питания	Тиристорные преобразователи с коэффициентом пульсации не более 1,1	
Степень защиты от внешних воздействий	IP44	IP22
Способ охлаждения	IC0141	IC01
Исполнение по способу монтажа	IM1001	IM1001
Климатические условия и категория размещения	У4	У4
Форма выступающего конца вала	Цилиндрическая	
Способ соединения с приводимым механизмом	Упругая муфта	

Дополнительные общие требования: показатели надежности и долговечности — средний срок службы не менее 12 лет; средний ресурс — не менее 30 000 ч; средний ресурс подшипников — не менее 12 000 ч; вероятность безотказной работы при доверительной вероятности 0,8 и наработке 2000 ч — 0,9.

§ 10-3. Магнитная цепь машины. Размеры, конфигурация, материал

Главные размеры. Проектирование машин постоянного тока начинается с определения главных размеров: наружного диаметра якоря $D_{н2}$ и длины сердечника якоря l_2. В гл. 1 было указано, что предельно допускаемая величина $D_{н1max}$ зависит от высоты оси вращения h. Если заданием на проектирование значение h не регламентировано, то его предварительно выбирают из табл. 10-1, 10-2, данные которых соответствуют существующему в СССР и за рубежом среднему уровню привязки мощностей к h двигателей с разными степенями защиты и способами охлаждения; для генераторов снижают мощности, указанные в таблицах, на 10—25% (больший процент снижения — для меньших мощностей).

В этих таблицах приведены также значения вращающего момента на валу M_2.

Предельно допускаемый наружный диаметр $D_{н1max}$ может быть определен, в зависимости от значения h, по (1-27) и (1-29) при монолитной станине и по (1-27) и (1-28) — при шихтованной.

Для определения одного из главных размеров — наружного диаметра сердечника якоря $D_{н2}$ — можно воспользоваться зависимостью $D_{н2}=f(D_{н1})$, приведенной на рис. 10-1, с учетом различного количества главных полюсов $2p$ и наличия компенсационной обмотки. При $h<112$ мм обычно применяют $2p=2$, а при

h, мм	P_2 (кВт) при различных значениях n, об/мин						M_2 (Н·м) при 1500 об/мин
	3000	2200	1500	1000	750	600	
Двигатели исполнения по защите IP22 со способом охлаждения IC01							
80	0,75	0,55	0,37	0,18	0,12	0,09	2,35
	1,1	0,75	0,55	0,25	0,18	0,12	3,5
90	—	—	—	0,37	0,25	0,18	—
	1,5	1,1	0,75	0,55	0,37	0,25	4,8
100	2,2	1,5	1,1	—	—	—	7,0
	3,0	2,2	1,5	0,75	0,55	0,37	9,5
112	4,0	3,0	2,2	1,1	0,75	0,55	14
	5,5	4,0	3,0	1,5	1,1	0,75	19
132	7,5	5,5	4,0	2,2	1,5	1,1	25,5
	11	7,5	5,5	3,0	2,2	1,5	35
160	15	11	7,5	4,0	3,0	2,2	47,5
	18,5	15	11	5,5	4,0	3,0	70
	22	18,5	—	7,5	5,5	4,0	—
180	30	22	15	—	—	—	95,5
	37	30	18,5	11	7,5	5,5	118
200	45	37	22	15	—	—	140
	55	45	30	18,5	11	7,5	190
225	—	—	—	—	15	11	—
	75	55	37	22	18,5	15	235
	90	75	45	30	22	18,5	285
250	—	90	55	37	30	22	350
	—	110	75	45	37	30	475
280	—	132	90	55	45	—	575
280	—	160	110	75	55	37	700
315	—	—	132	—	—	—	840
	—	—	160	90	—	45	1020
	—	—	200	110	75	55	1270
Двигатели исполнения по защите IP44 со способом охлаждения IC0141							
80	0,55	0,37	0,25	0,18	0,12	—	1,5
	0,75	0,55	0,37	0,25	0,18	—	2,35
90	1,1	0,75	0,55	0,37	0,25	—	3,5
	1,5	1,1	0,75	0,55	0,37	—	4,8
112	2,2	1,5	1,1	0,75	0,55	—	7,0
	3,0	2,2	1,5	1,1	0,75	—	9,5
132	4,0	3,0	2,2	1,5	1,1	—	14
	5,5	4,0	3,0	2,2	1,5	—	19
160	7,5	5,5	4,0	3,0	2,2	—	25,5
	11	7,5	5,5	4,0	3,0	—	35
180	15	11	7,5	5,5	4,0	—	47,5
	18,5	15	11	7,5	5,5	—	70
200	22	18,5	—	—	—	—	—
	30	22	15	11	7,5	—	95,5
Двигатели исполнения по защите IP44 со способом охлаждения IC0041							
80	0,37	0,25	0,18	0,12	0,09	—	1,15
	0,55	0,37	0,25	0,18	0,12	—	1,5
90	0,75	0,55	0,37	0,25	0,18	—	2,35
	1,1	0,75	0,55	0,37	0,25	—	3,5
112	1,5	1,1	0,75	0,55	0,37	—	4,8
	2,2	1,5	1,1	0,75	0,55	—	7,0

Продолжение

h, мм	P_2 (кВт) при различных значениях n, об/мин						M_2 (Н·м) при 1500 об/мин
	3000	2200	1500	1000	750	600	
132	3,0	2,2	1,5	1,1	0,75	—	9,5
	4,0	3,0	2,2	1,5	1,1	—	14
160	5,5	4,0	3,0	2,2	1,5	—	19
	7,5	5,5	4,0	3,0	2,2	—	25,5
180	11	7,5	5,5	4,0	3,0	—	35
	15	11	7,5	5,5	4,0	—	47,5
200	—	—	—	—	—	—	—
	18,5	15	11	7,5	5,5	—	70

Таблица 10-2

h (мм) при		P_2 (кВт) для следующих частот вращения, об/мин										M_2 (Н·м) при частотах вращения, об/мин	
монолитной станине	шихтованной станине	1500	1250	1000	800	630	500	400	315	250	200	800	500
Двигатели исполнения IP22 (или IP23) и IP44 со способом охлаждения IC17 или IC37													
400	350	—	200	160	110	—	—	—	—	—	—	1315	—
		—	—	200	160	110	—	—	—	—	—	1910	—
		—	—	—	200	160	110	—	—	—	—	—	2100
		—	—	—	—	200	160	110	—	—	—	—	3055
450	400	500	400	315	250	—	—	132	—	—	—	2985	—
		—	500	400	315	250	200	160	132	—	—	—	3820
		—	—	500	400	315	250	200	160	132	—	—	4775
		—	—	—	—	400	315	250	200	160	—	—	6015
500	450	—	—	—	500	—	—	—	—	—	—	5970	—
		—	—	—	—	500	400	315	250	200	—	—	7640
		—	—	—	—	—	500	400	315	250	200	—	9550

$h \geqslant 112$ мм — $2p=4$. Компенсационную обмотку используют в машинах с $h \geqslant 355$ мм, работающих, как правило, в более тяжелых условиях: высоких пусковых, тормозных и перегрузочных моментов и широких диапазонов регулирования частоты вращения путем ослабления поля.

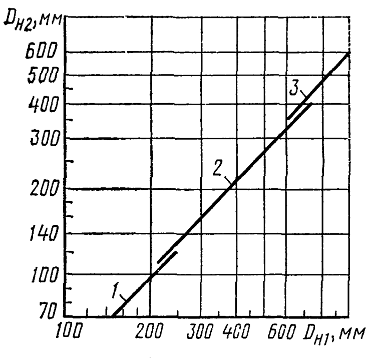


Рис. 10-1. Средние значения $D_{н2}=f(D_{н1})$:

1 — $2p=2$; 2 — $2p=4$ (без компенсационной обмотки); 3 — $2p=4$ (с компенсационной обмоткой)

Для удобства выбора диаметров $D_{н1}$ и $D_{н2}$ при заданной или выбранной стандартной высоте оси вращения h в табл. 10-3 приведены предельно допускаемые значения $D_{н1max}$ и $D_{н2max}$ для $h=80 \div 500$ мм. Здесь же указаны допуски на штамповку $\Delta_{шт}$, а также ширина резаных лент и стандартной рулонной стали, из которых штампуются листы сердечника якоря. При $D_{н2} \leqslant 457$ мм (что соответствует $h \leqslant 400$ мм) листы якоря штам-

пуют из резаной ленты, которая по согласованию сторон может поставляться различной ширины, не превышающей 500 мм. При $D_{н2}>457$ мм листы якоря штампуют из рулонной стали стандартной ширины, указанной в § 2-3. Данные табл. 10-3 соответствуют выполнению машин с монолитной станиной; при шихтованной станине размеры $D_{н1}$ и $D_{н2}$, определяемые по (1-28) и рис. 10-1, соответственно отличаются от данных табл. 10-3.

Таблица 10-3

Высота, мм		Диаметр, мм		$2p$	$\Delta_{шт}$, мм	Ширина (мм) при однорядной штамповке	
h	h_1	$D_{н1max}$	$D_{н2max}$			резаных лент	рулонной стали
80	4	152	73	2	4	77	—
90	5	170	82	2	4	86	—
100	5	190	93	2	4	97	—
112	5	214	109	4	5	114	—
132	6	252	130	4	5	135	—
160	6	308	160	4	6	166	—
180	7	346	181	4	7	188	—
200	7	386	202	4	7	209	—
225	7	436	230	4	7	237	—
250	8	484	258	4	7	265	—
280	8	544	290	4	7	297	—
315	9	612	330	4	7	337	—
355	9	692	398	4	8	406	—
400	10	780	457	4	8	465	—
450	11	878	522	4	8	—	530
500	11	978	592	4	8	—	600

При проектировании части серии (двух машин и более на одном диаметре) для облегчения производства необходимо унифицировать основные размеры и конфигурацию магнитопровода машины в его поперечном сечении — диаметры $D_{н1}$, $D_{н2}$, внутренний диаметр станины D_1, внутренний диаметр листов якоря D_2, наружный диаметр коллектора $D_к$, конфигурацию и размеры листов главных и добавочных полюсов, а при полузакрытых пазах якоря также количество и размеры пазов якоря, количество и размеры коллекторных пластин.

Расчетную мощность P' определяют для двигателей по (1-25), а для генераторов — по (1-26). Для двигателей значение коэффициента $k_н$ в (1-25) принимают из рис. 10-2. Для генераторов вместо $k_н$ подставляют в (1-26) значение $(2—k_н)$.

Значение коэффициента $k_т$ в (1-25) для двигателей с параллельным и смешанным возбуждением принимают из рис. 10-3. Для генераторов с параллельным возбуждением вместо $k_т$ подставляют в (1-26) величину $2—k_т$. Для машин (двигателей и генераторов) с независимым или последовательным возбуждением $k_т=1$.

Предварительное значение КПД η' для двигателей и генераторов может быть принято на уровне средних энергетических показателей выпускаемых машин (рис. 10-4). Учитывая, что значение η' — предварительное, уточняемое в дальнейших расчетах, можно пренебречь влиянием на его величину класса нагревостойкости изоляции, а следовательно, допускаемых электромагнитных нагрузок.

Для определения второго главного размера — длины сердечника якоря — вначале по (1-32) находят расчетную длину сердечника l'_2. При этом задаются предварительным значением

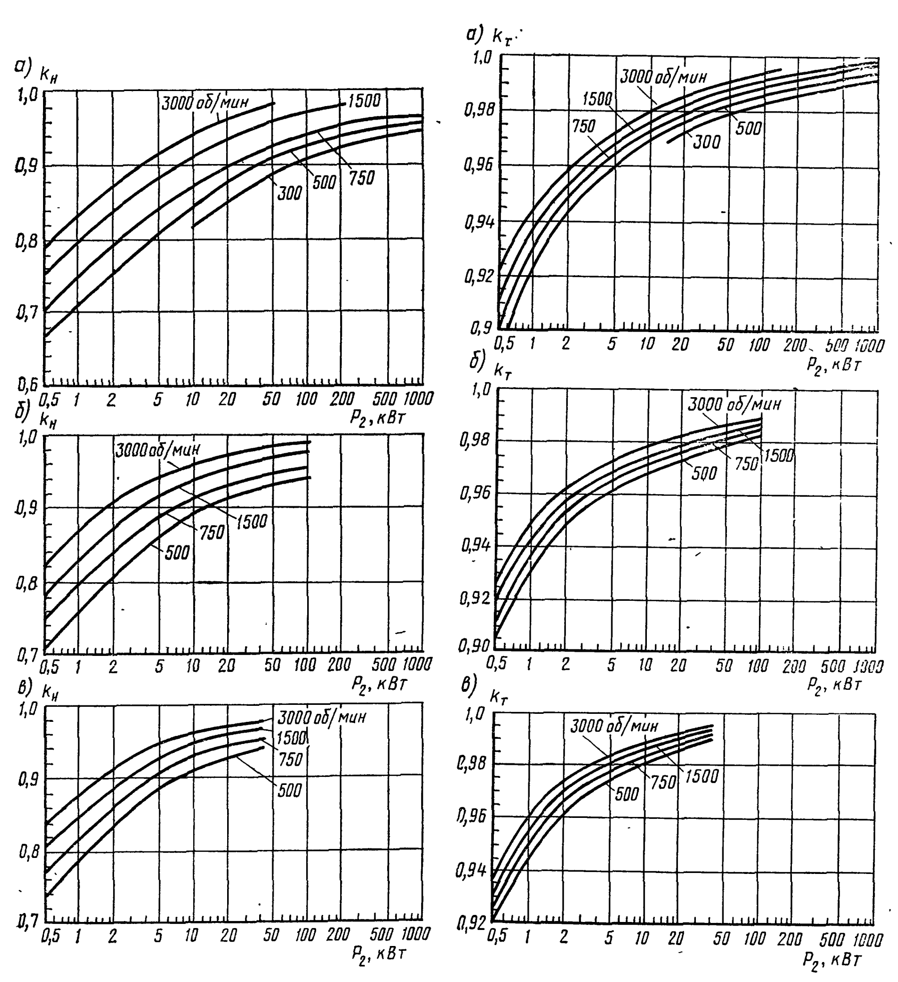


Рис. 10-2. Средние значения $k_н=f(P_2)$ для двигателей:

а — исполнение по защите IP22; способ охлаждения IC01; *б* — исполнение по защите IP44; способ охлаждения IC0141; *в* — исполнение по защите IP44; способ охлаждения IC0041

Рис. 10-3. Средние значения $k_т=f(P_2)$ для двигателей:

а — исполнение по защите IP22; способ охлаждения IC01; *б* — исполнение по защите IP44; способ охлаждения IC0141; *в* — исполнение по защите IP44; способ охлаждения IC0041

электромагнитных нагрузок A'_2 и B'_δ, а также расчетным коэффициентом полюсной дуги α'.

Выбор значений A'_2 и B'_δ зависит от ряда факторов, в том числе от формы пазов и вида обмотки якоря. При $D_{н2} \leqslant 202$ мм

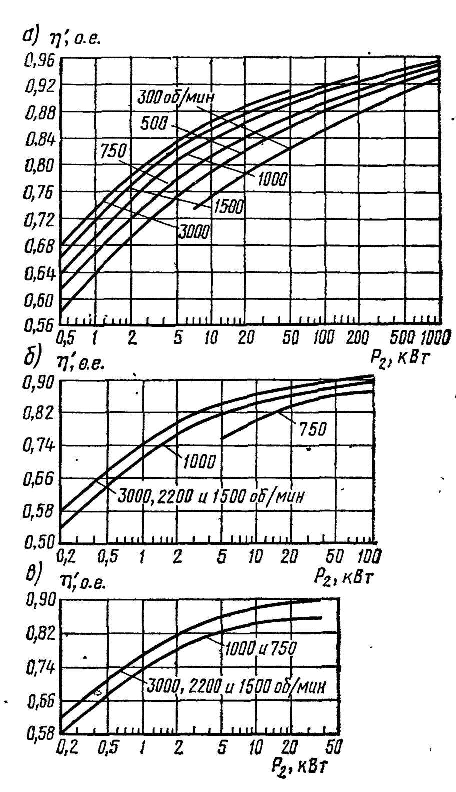


Рис. 10-4. Средние значения $\eta' = f(P_2)$:

а — исполнение по защите IP22; способ охлаждения IC01; *б* — исполнение по защите IP44; способ охлаждения IC0141; *в* — исполнение по защите IP44; способ охлаждения IC0041

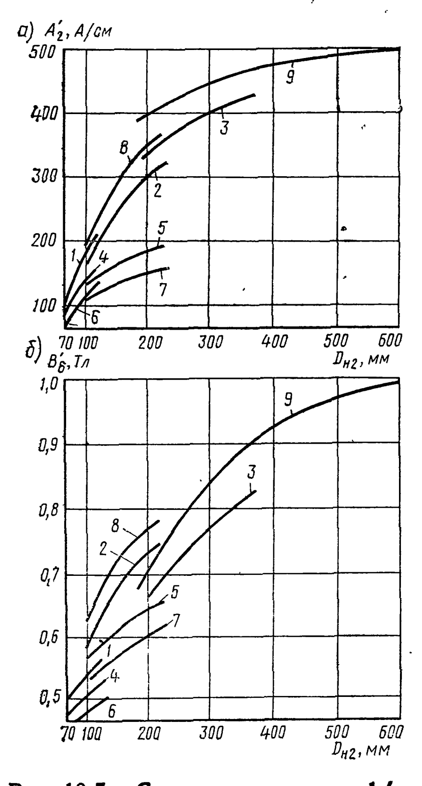


Рис. 10-5. Средние значения $A'_2 = f(D_{н2})$ (*а*) и $B'_\delta = f(D_{н2})$ (*б*) при классе нагревостойкости изоляции F:

1 — исполнение по защите IP22, способ охлаждения IC01, полузакрытые пазы якоря, частота вращения 1500 об/мин, число главных полюсов $2p=2$; *2* — то же, что *1*, но $2p=4$; *3* — IP22, IC01, открытые пазы, 1500 об/мин, $2p=4$; *4* — IP44, IC0141, полузакрытые пазы, 1500 об/мин, $2p=2$; *5* — то же, что *4*, но $2p=4$; *6* — IP44, IC0041, полузакрытые пазы, 1500 об/мин, $2p=2$; *7* — то же, что *6*, но $2p=4$; *8* — IP22 или IP44 IC17 или IC37, полузакрытые пазы, все частоты вращения, $2p=4$; *9* — то же, что *8*, но открытые пазы

(что соответствует $h \leqslant 200$ мм) применяют полузакрытые овальные пазы со всыпной обмоткой якоря из проводов круглого поперечного сечения. При $D_{н2} > 202$ мм якорь имеет открытые прямоугольные пазы с обмоткой, выполняемой жесткими секциями из проводов прямоугольного поперечного сечения. Преимущества и недостатки этих двух видов исполнений указаны в § 9-4.

На рис. 10-5 приведены средние значения A'_2 и B'_δ, а на рис. 10-6 — α'.

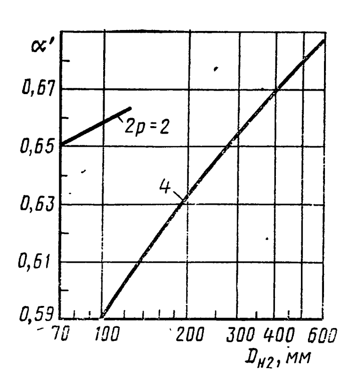


Рис. 10-6. Средние значения $\alpha' = f(D_{н2})$

Для машин со способами охлаждения IC01, IC0141 и IC0041 значения A'_2 и B'_δ соответствуют исполнению с изоляцией класса нагревостойкости F и с частотой вращения 1500 об/мин. При изоляции классов нагревостойкости В и Н, а также при частотах вращения, отличающихся от 1500 об/мин, принимаемое из рис. 10-5 значение A'_2 умножают на коэффициенты k_1 и k_4, а B'_δ — на коэффициенты k_2 и k_5, где поправочные коэффициенты k_1 и k_2 (табл. 10-4) учитывают влияние на принимаемые электромагнитные нагрузки изменения допускаемого превышения температуры обмоток при классах нагревостойкости изоляции В и Н, а k_4 и k_5 (табл. 10-5) — влияние изменения эффекта охлаждения обмоток при других частотах вращения.

Для машин со способами охлаждения IC17 и IC37 значения A'_2 и B'_δ (рис. 10-5) также соответствуют изоляции класса нагре-

Таблица 10-4

Коэффициент	Поправочные коэффициенты при классе нагревостойкости					
	B			H		
	IP22; IC01 IP22; IC17 IP44; IC37	IP44; IC0141	IP44; IC0041	IP22; IC01 IP22; IC17 IP44; IC37	IP44; IC0141	IP44; IC0041
k_1 (для A'_2)	0,91	0,87	0,83	1,1	1,15	1,2
k_2 (для B'_δ)	0,97	0,97	0,97	1,04	1,04	1,04
k_3 (для $J'_п$, $J'_д$)	0,91	0,87	0,83	1,1	1,15	1,2

Таблица 10-5

Коэффициент	Степень защиты, способ охлаждения	Диаметр $D_{н2}$, мм	Коэффициенты k_4, k_5 и k_6 при частоте вращения, об/мин				
			3000	2200	1000	750	500
k_4 (для A'_2)	IP22; IC01	80—120	1,15	1,09	0,92	0,88	0,82
		Свыше 120—220	1,03	1,07	0,94	0,91	0,87
		Свыше 220—360	0,96	1,02	0,98	0,95	0,92
	IP44; IC0141 IC0041	80—120	0,86	0,95	1,03	1,04	1,05
		Свыше 120—220	0,77	0,92	1,05	1,07	1,08
k_5 (для B'_δ)	IP22; IC01	80—360	1,03	1,02	0,94	0,91	0,87
	IP44; IC0141 IC0041	80—220	1,06	1,04	0,96	0,93	0,9
k_6 (для $J'_п$, $J'_д$)	IP22; IC01	80—360	1,21	1,13	0,88	0,81	0,74
	IP44; IC0141 IC0041	80—220	1,17	1,09	0,92	0,88	0,8

востойкости F; при изоляции классов B и H значение A'_2 умножают на коэффициент k_1, а B'_δ — на коэффициент k_2. Частота вращения при этих способах охлаждения практически не влияет на эффект вентиляции и соответственно на принимаемые электромагнитные нагрузки.

Электромагнитные нагрузки двигателей со степенью защиты IP22 и способом охлаждения от пристроенного электровентилятора IC06 принимают, как при способе охлаждения IC17. Для двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения от пристроенного электровентилятора IC0641 электромагнитные нагрузки вне зависимости от частоты вращения могут быть приняты такими же, как у двигателей со способом охлаждения IC0141 при $n = 1500$ об/мин. Отношение

$$\lambda = l'_2/D_{н2} \qquad (10\text{-}1)$$

целесообразно выбирать таким, чтобы оно приближалось к λ_{max}, указанному на рис. 10-7, но не превышало его. Если λ выходит за пределы λ_{max}, то, как указано в § 1-3, необходимо перейти на другую, бо́льшую стандартную высоту оси вращения и повторить расчет главных размеров и λ.

При проектировании части серии с двумя или тремя длинами сердечника якоря на одном диаметре, значение λ машины большей мощности должно приближаться к λ_{max}, но не превышать его; значение λ машины меньшей мощности не регламентируется.

В отдельных случаях, например у тихоходных машин, значение λ_{max} может быть увеличено в сравнении с данными рис. 10-7, но с соответствующей проверкой механической жесткости и прочности вала, а также коммутационных параметров машины.

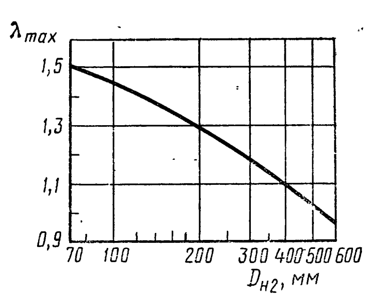


Рис. 10-7. Значения $\lambda_{max} = f(D_{н2})$

Питание двигателей постоянного тока осуществляется в настоящее время главным образом от тиристорных преобразователей. В то время как у генераторов постоянного тока пульсация напряжения мала и на работе двигателей практически не отражается, при питании от тиристорных преобразователей в кривых напряжения и тока возникают значительные переменные составляющие, которые ухудшают потенциальные условия на коллекторе и коммутацию двигателей, особенно при регулировании частоты вращения путем ослабления поля главных полюсов; пульсации увеличивают также магнитные потери в стали и нагрев двигателей [27].

Уровень указанных осложнений работы двигателей зависит от качества выпрямления, которое определяется формой кривой выпрямленного напряжения и характеризуется коэффициентом пульсации, представляющим собой отношение амплитуды первой гармонической к среднему значению выпрямленного напряжения.

Для уменьшения пульсаций у двигателей с $h \leqslant 315$ мм обычно применяют питание от трехфазной мостовой схемы без сглаживающих фильтров. Особенно неблагоприятно влияют пульсации напряжения и тока на работу двигателей большой мощности с $h \geqslant 355$ мм, поэтому у таких двигателей осуществляют питание от 6- или 12-фазных выпрямителей, а также сглаживающие фильтры. При указанных схемах питания может быть обеспечен коэффициент пульсации, не превышающий 1,1.

Чтобы улучшить работу двигателей, питаемых пульсирующим напряжением, используют шихтованные станины, однако при этом несколько усложняется конструкция двигателей и увеличивается трудоемкость их изготовления.

При проектировании двигателей с монолитной станиной, питаемых от тиристорных преобразователей с коэффициентом пульсации более 1,1, значения A'_2 по рис. 10-5, *а* следует снижать на 10%, а B'_δ по рис. 10-5, *б* — на 5%.

Сердечник якоря. Сердечник собирают из отдельных отштампованных листов толщиной 0,5 мм, покрытых изоляционным лаком для уменьшения потерь в стали от вихревых токов. Для сердечников рекомендуются следующие марки холоднокатаной изотропной электротехнической стали:

Высота оси вращения, мм	80—200	225—315	355—500
Марка стали	2013	2312	2411

Коэффициент заполнения сердечника якоря сталью $k_c = 0{,}95$.

При сборке сердечника размеры пазов в штампе и в свету не совпадают из-за смещения листов друг относительно друга. Припуски на сборку сердечника, приведенные в табл. 10-6, больше в случае штамповки отдельным (пазным) штампом, применяемым при изготовлении небольших партий машин; при массовом изготовлении используют комплектный (компаундный) штамп.

Таблица 10-6

Высота оси вращения h, мм	Припуск на сборку сердечника по ширине паза b_c (мм) для штампов		Припуск на сборку сердечника по высоте паза h_c (мм) для штампов	
	компаундный	пазный	компаундный	пазный
80—132	0,1	0,15	—	—
160—200	0,2	0,25	—	—
225—315	0,3	0,35	0,3	0,35
355—500	0,35	0,4	0,3	0,35

Для повышения устойчивости работы регулируемых двигателей при низких частотах вращения, а также для снижения магнитного шума машин делают скос пазов в сердечнике. Скос может быть в пределах от 1/2 до 1 зубцового деления.

При $l'_2 \leqslant 350$ мм конструктивная длина сердечника якоря $l_2 = l'_2$ с округлением до ближайшего целого числа (при длине менее 100) или до ближайшего числа, кратного пяти (при длине 100—350 мм). При $l'_2 > 350$ мм для улучшения охлаждения в сер-

дечнике якоря целесообразно применение радиальных вентиляционных каналов (рис. 10-8). В этом случае значение l_2 определяется по (1-34) с округлением до ближайшего числа, кратного пяти. Количество вентиляционных каналов $n_{к2}$ определяется длиной одного пакета сердечника якоря, выбираемой в пределах 55—75 мм; длина вентиляционного канала $l_{к2}=10$ мм. Следует учесть, что при округлении l_2 соответственно изменяется расчетная длина сердечника l_2'.

Эффективная длина сердечника якоря (мм) при отсутствии радиальных каналов

$$l_{эф2}=k_c l_2; \tag{10-2}$$

при наличии радиальных каналов

$$l_{эф2}=k_c(l_2-n_{к2}\,l_{к2}). \tag{10-3}$$

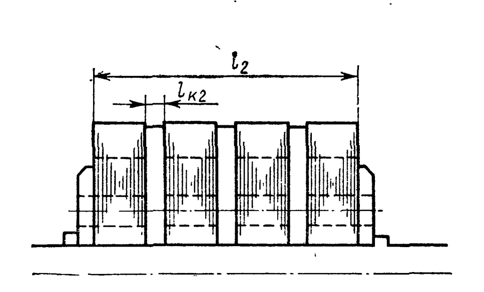


Рис. 10-8. Сердечник якоря с радиальными вентиляционными каналами

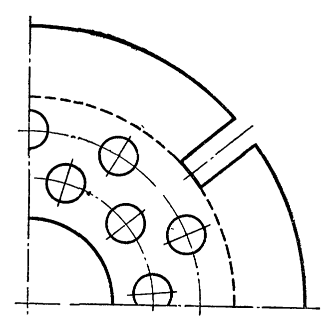


Рис. 10-9. Лист якоря с аксиальными вентиляционными каналами

С целью улучшения охлаждения, а также для уменьшения массы и динамического момента инерции якоря в сердечниках якорей машин с $h=225\div500$ мм предусматривают каналы в коллекторе, а также круглые аксиальные вентиляционные каналы в сердечнике якоря (рис. 10-9) в соответствии с данными, приведенными ниже (N — количество рядов):

h, мм	225	250	280	315	355	400	450	500
N	1	1	2	2	2	2	2	2
$n_{к2}$	17	19	21	23	26	30	34	38
$d_{к2}$, мм	15	16	18	20	23	26	29	32

У машин с $h\leqslant200$ мм аксиальные каналы обычно не предусматривают из-за повышения при этом магнитной индукции в спинке якоря и затруднения с размещением каналов в коллекторе.

Предварительное значение внутреннего диаметра листов якоря D_2 определяют из рис. 10-10. При выполнении механического расчета вала на прогиб диаметр D_2 при необходимости может быть изменен.

Сердечники главных полюсов. Сердечники собирают из штампованных листов анизотропной холоднокатаной электротехнической стали марки 3411 толщиной 1 мм; коэффициент заполнения сер-

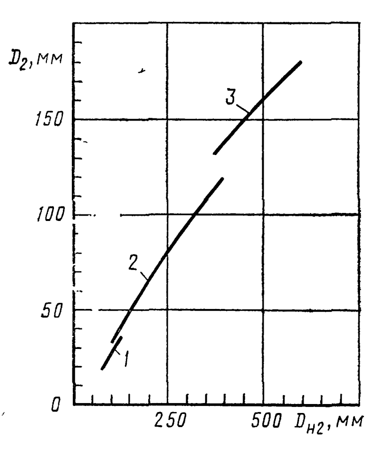


Рис. 10-10. Средние значения $D_2=f(D_{н2})$:

1 — полузакрытые пазы якоря; $2p=2$; *2* — то же, что *1*, но $2p=4$; *3* — открытые пазы якоря, $2p=4$

дечника сталью $k_с=0,98$. Указанная марка стали, обладающая повышенной магнитной проницаемостью вдоль проката, снижает магнитное напряжение полюсов, но только если при штамповке ось листа полюса совпадает с направлением проката. В этом случае поперек проката, а следовательно поперек полюса, сталь будет обладать значительно меньшей магнитной проводимостью, поэтому уменьшается размагничивающее действие реакции якоря. Одновременно уменьшается магнитный поток рассеяния между главными и добавочными полюсами, что улучшает коммутацию. Листы не имеют изолирующего покрытия, так как сердечники полюсов не подвергаются периодическому перемагничиванию.

Количество главных полюсов $2p$ влияет на технико-экономические показатели машины. При увеличении $2p$ уменьшается ток, приходящийся на щеточный бракет, что при неизменной ширине щеток уменьшает длину коллектора, лобовых частей обмотки якоря, а следовательно, и всей машины. Увеличение $2p$ уменьшает площадь поперечного сечения станины, что при неизменной ее длине снижает толщину станины и массу машины. Вместе с тем увеличение $2p$ повышает максимальное напряжение между коллекторными пластинами, уменьшает расстояние между главными и добавочными полюсами, в результате чего понижаются допустимое значение α' и коэффициент использования машины. Увеличение $2p$ также повышает трудоемкость изготовления машины.

В соответствии с опытом электромашиностроения, учитывающим указанные противоречивые требования, целесообразно применять $2p=2$ для машин с $h=80\div100$ мм и $2p=4$ для машин с $h=112\div500$ мм.

Форма наконечника полюса определяется видом выбранного воздушного зазора между главными полюсами и якорем. У некомпенсированных машин для уменьшения размагничивающего действия реакции якоря и понижения уровня магнитного шума машин применяют эксцентричный зазор, при котором центры радиусов якоря и полюсной дуги не совпадают (рис. 10-11), при этом зазор δ' имеет наименьшее значение под серединой полюса, постепенно увеличиваясь к его краям. У компенсированной машины нет необходимости в устройстве эксцентричного зазора, так как МДС компенсационной обмотки направлена против МДС обмотки якоря и нейтрализует ее; у таких машин применяют концентричный зазор (рис. 10-12), одинаковый по всей ширине полюсного наконечника.

Для размещения компенсационной обмотки в штампуемых листах полюса предусматривают прямоугольные пазы.

Выбирают величину воздушного зазора δ с учетом противоречивых требований, так как при увеличении воздушного зазора повышаются его магнитное напряжение, МДС и потери обмотки возбуждения, но уменьшается размагничивающее действие реакции якоря и улучшается устойчивость скоростной характеристики двигателя. На рис. 10-13 приведены средние значения $\delta = f(D_{н2})$, применяемые на практике.

При применении эксцентричного зазора целесообразно выбирать $\delta'' = 3\delta'$, где δ', δ'' — высота зазора у оси и у края полюса соответственно. Принимаемый для расчета магнитной цепи по рис. 10-13 эквивалентный зазор (мм)

$$\delta = 0{,}75\delta' + 0{,}25\delta''. \qquad (10\text{-}4)$$

Соответственно $\delta' = \delta/1{,}5$; $\delta'' = 2\delta$.

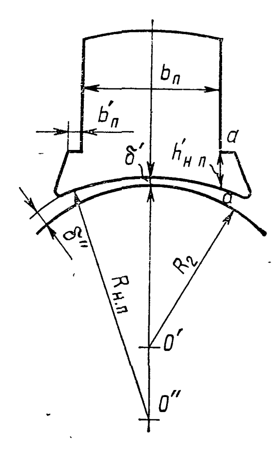


Рис. 10-11. Лист главного полюса некомпенсированной машины с эксцентричным зазором

Длина сердечника полюса $l_п = l_2$; высоту полюса $h_п$ рассчитывают по (10-15), после определения размеров станины, причем высота полюса должна быть достаточной для размещения обмот-

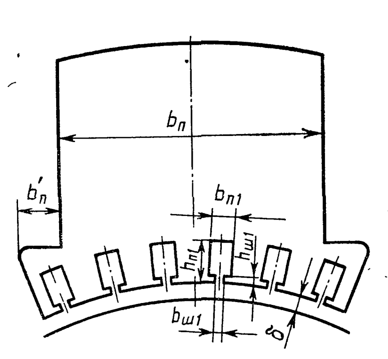


Рис. 10-12. Лист главного полюса машины с компенсационной обмоткой, с концентричным зазором

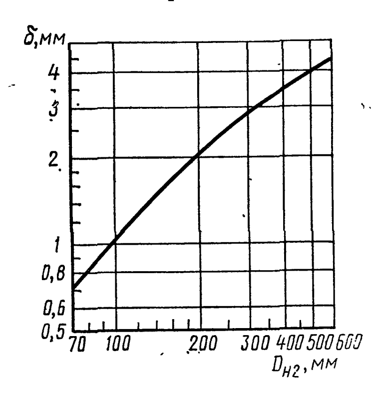


Рис. 10-13. Средние значения $\delta = f(D_{н2})$

ки возбуждения; после расчета обмотки возбуждения и вычерчивания эскиза междуполюсного окна с расположением катушек $h_п$ может измениться.

Расчетная ширина полюсной дуги (мм)

$$b_{н.п}' = \alpha'\tau, \qquad (10\text{-}5)$$

где полюсное деление τ определяют по (1-19).

Действительная ширина полюсной дуги у некомпенсированной машины с эксцентричным зазором

$$b_{н.п}=b_{н.п}'; \qquad (10\text{-}6)$$

у компенсированной машины с концентричным зазором

$$b_{н.п}=b_{н.п}'-2\delta. \qquad (10\text{-}7)$$

Предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре (Вб)

$$\Phi'=B'_{\delta}b_{н.п}l'_2\cdot 10^{-6}. \qquad (10\text{-}8)$$

Эффективная длина сердечника полюса (мм)

$$l_{эф.п}=k_c\, l_п. \qquad (10\text{-}9)$$

Ширина сердечника полюса (мм)

$$b_п=\sigma\Phi'\cdot 10^6/(l_{эф.п}B'_п), \qquad (10\text{-}10)$$

где σ — коэффициент магнитного рассеяния главных полюсов (при $2p=2\sigma\approx1{,}15$, а при $2p=4$ — $\sigma\approx1{,}2$); $B'_п$ — предварительная магнитная индукция в сердечнике полюса, Тл:

Исполнение машины	IP22; IP22; IC01 IC17	IP44; IC37	IP44; IC0141	IP44; IC0041
Магнитная индукция $B'_п$, Тл	1,6—1,7		1,4—1,5	1,35—1,45

Ширина уступа полюса, предназначенная для упора обмотки возбуждения при ее креплении, $b_п'=(0{,}07\div0{,}14)b_п$.

Площадь поперечного сечения наконечника «a — a» у машин без компенсационной обмотки должна быть такой, чтобы магнитная индукция в этом сечении не превышала 0,86 $B_п'$. Исходя из этого, принимают в сечении «a — a» высоту (мм)

$$h'_{н.п}=(b_{н.п}-b_п)B'_{\delta}/(1{,}67B'_п). \qquad (10\text{-}11)$$

Сердечники добавочных полюсов. Сердечники собирают из штампованных листов анизотропной электротехнической стали 3411 толщиной 1 мм, коэффициент заполнения сердечника сталью $k_c=0{,}98$. Преимущества применения этой стали, а также особенности штамповки такие же, как у главных полюсов. Листы сердечника не имеют изолирующего покрытия. В машинах с $2p=2$ применяют один добавочный полюс ($2p_д=1$), а с $2p=4$ — четыре ($2p_д=4$).

Длина наконечника $l_{н.д}$ добавочного полюса равна l_2. Сердечники полюсов шихтуются либо поперек оси (рис. 10-14,*а*), либо вдоль оси машины (рис. 10-14,*б*), в зависимости от того, с какой стороны целесообразно образовать выступы для упора катушек при их креплении; размер выступа 5—8 мм.

У машин с $h=355\div500$ мм сердечники полюсов собирают из штампованных листов Т-образной формы (рис. 10-14,*в*), которая усиливает прочность крепления полюса к станине и одновременно снижает магнитную индукцию в наиболее насыщенном участке полюса.

Предварительное значение ширины сердечника добавочного полюса $b'_д$ принимают по рис. 10-15.

Величину воздушного зазора $\delta_д$ выбирают с учетом противоречивых требований. Повышение воздушного зазора увеличивает МДС и потери обмотки добавочных полюсов, а также коэффициент рассеяния магнитного потока добавочных полюсов, но вместе с тем уменьшает МДС, необходимую для проведения этого магнитного потока через стальные участки магнитной цепи, содействуя осуществлению прямолинейной зависимости ЭДС $E_к$ от тока нагрузки (см. § 10-12). На рис. 10-16 приведены средние значения $\delta_д = f(D_{н2})$, применяемые на практике. При расчете коммутационных параметров в § 10-12 значения $\delta_д$ могут уточняться. Высоту добавочного полюса $h_д$ рассчитывают по (10-16).

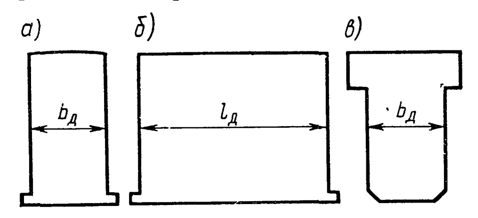


Рис. 10-14. *Лист добавочного полюса с шихтовкой поперек (а) и вдоль (б) оси машины, а также Т-образной формы (в)*

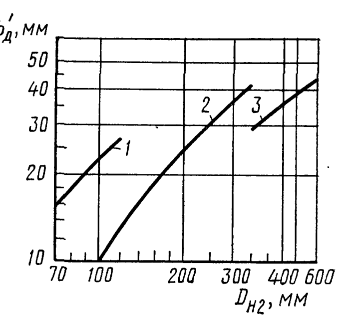


Рис. 10-15. Средние значения $b_д' = f(D_{н2})$:

1 — $2p=2$, половинное число добавочных полюсов ($2p_д=1$); *2* — $2p=4$, полное число добавочных полюсов ($2p_д=4$); *3* — то же — машина с компенсационной обмоткой

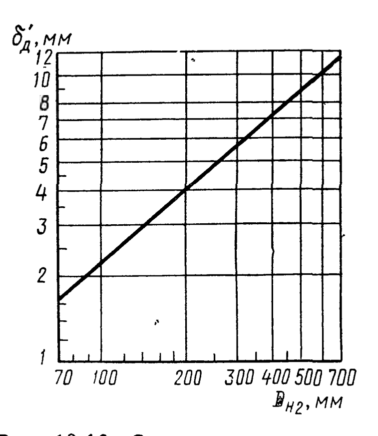


Рис. 10-16. Средние значения $\delta_д' = f(D_{н2})$

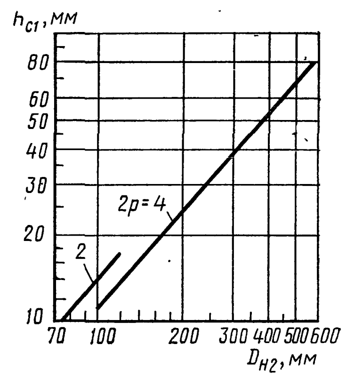


Рис. 10-17. Средние значения $h_{c1} = f(D_{н2})$

Станина. Монолитные станины выполняют из Ст3. В машинах с $h = 355 \div 500$ мм могут применяться для улучшения коммутации станины, шихтованные из штампованных листов электротехнической стали 2312 толщиной 1 мм, коэффициент заполнения сердечника сталью $k_c = 0{,}98$.

2. Магнитная цепь машины. Размеры, конфигурация, материал

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
			Главные размеры	
1	h, мм	табл. 10-1	160	—
2	h, мм	табл. 10-1	—	280
3	$D_{корп}$, мм	(1-27), рис. 1-3	2 (160—6) = 308	2 (280—8) = 544
4	$D_{н1}$, мм	(1-29), табл. 10-3	308	544
5	$D_{н2}$, мм	рис. 10-1, табл. 10-3	160	290
6	$k_н$	рис. 10-2	0,915	0,94
7	$k_т$	рис. 10-3	0,978	0,99
8	η', о. е.	рис. 10-4	0,82	0,905
9	P', Вт	(1-25)	$\frac{0,915 \cdot 0,978 \cdot 5500}{0,82} = 6002$	$\frac{0,94 \cdot 0,99 \cdot 75\,000}{0,905} = 77\,122$
			Принимаем изоляцию класса нагревостойкости F	
10	A'_2, А/см	рис. 10-5, *а*, табл. 10-5	165	0,98·403=395
11	B'_δ, Тл	рис. 10-5, *б*, табл. 10-5	0,615	0,94·0,765=0,72
12	α'	рис. 10-6	0,62	0,653
13	l'_2, мм	(1-32)	$\frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot 6002}{160^2 \cdot 1500 \cdot 165 \cdot 0,615 \cdot 0,62} = 152$	$\frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot 77\,122}{290^2 \cdot 1000 \cdot 395 \cdot 0,72 \cdot 0,653} = 301$
14	λ	(10-1)	152/160=0,95	301/290=1,04
15	λ_{max}	рис. 10-7	1,34	1,2

Сердечник якоря

Принимаем для сердечника якоря: сталь 2013, толщина 0,5 мм, листы сердечника якоря лакированные; форма пазов для двигателя № 1 полузакрытая овальная, для двигателя № 2 — открытая прямоугольная; род обмотки для двигателя № 1 двухслойная всыпная, для двигателя № 2 — двухслойная из жестких секций; скос пазов для двигателя № 1 на 1/2 зубцового деления, для двигателя № 2 — на 1 зубцовое деление.

16	$k_с$	§ 10-3	0,95	0,95
17	$b_с$, мм	табл. 10-6	0,2	0,3
18	$h_с$, мм	то же	—	0,3
19	l_2, мм	§ 10-3	155	300
20	$l_{эф2}$, мм	(10-2)	0,95·155=147,2	0,95·300=285
21	$n_{к2}$	§ 10-3	—	21
22	$d_{к2}$, мм	§ 10-3	—	18
23	D_2, мм	рис. 10-10	50	90

Сердечник главных полюсов

Принимаем для сердечников главных полюсов сталь 3411, толщина 1 мм, листы сердечников полюсов неизолированные; компенсационная обмотка не требуется; вид воздушного зазора между главными полюсами и якорем эксцентричный.

24	$k_с$	§ 10-3	0,98	0,98
25	$2p$	§ 10-3	4	4
26	δ, мм	рис. 10-13	1,6	2,7

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
27	δ', мм	(10-4)	$1,6/1,5=1,07$	$2,7/1,5=1,8$
28	δ'', мм	(10-4)	$2\cdot1,6=3,2$	$2\cdot2,7=5,4$
29	$l_п$, мм	§ 10-3	155	300
30	τ, мм	(1-19)	$\pi\cdot160/4=125,6$	$\pi\cdot290/4=227,6$
31	$b'_{н.п}$, мм	(10-5)	$0,62\cdot125,6=77,9$	$0,653\cdot228=148,9$
32	$b_{н.п}$, мм	(10-6)	78	149
33	$B'_п$, Тл	§ 10-3	1,45	1,65
34	Φ', Вб	(10-8)	$0,615\cdot77,9\cdot155\cdot10^{-6}=$ $=7,43\cdot10^{-3}$	$0,72\cdot148,9\cdot300\cdot10^{-6}=$ $=32,16\cdot10^{-3}$
35	$l_{эф.п}$, мм	(10-9)	$0,98\cdot155=151,9$	$0,98\cdot300=294$
36	$b_п$, мм	(10-10)	$\frac{1,2\cdot7,43\cdot10^{-3}}{0,98\cdot155\cdot1,45}\cdot10^6=40$	$\frac{1,2\cdot32,16\cdot10^{-3}}{0,98\cdot300\cdot1,65}\cdot10^6=80$
37	$b'_п$, мм	§ 10-3	$0,1\cdot40=4$	$0,08\cdot80\approx6,5$
38	$h'_{н.п}$, мм	(10-11)	$\frac{(77,9-40)\,0,615}{1,67\cdot1,45}=9,63$	$\frac{(148,9-80)\,0,72}{1,67\cdot1,65}=17,95$

Сердечники добавочных полюсов

Принимаем для сердечников добавочных полюсов сталь марки 3411 толщиной 1 мм, листы сердечников полюсов неизолированные.

39	$k_с$	§ 10-3	0,98	0,98
40	$2p_д$	§ 10-3	4	4
41	$l_{н.д}$, мм	§ 10-3	155	300
42	$l_д$, мм	§ 10-3	$155-2\cdot5=145$	300
43	$b'_д$, мм	рис. 10-15	19	35
44	$\delta'_д$, мм	рис. 10-16	3,3	5,4

Станина

Принимаем монолитную станину из стали марки Ст3.

45	l_1, мм	§ 10-3	$155+0,65\cdot125,6\approx235$	$300+0,65\cdot227,6\approx450$
46	$B'_{с1}$, Тл	§ 10-3	1,15	1,25
47	$h_{с1}$, мм	(10-12)	$\frac{1,2\cdot7,43\cdot10^{-3}}{2\cdot235\cdot1,15}\,10^6=17$	$\frac{1,2\cdot32,16\cdot10^{-3}}{2\cdot450\cdot1,25}\,10^6=34$
48	$h_{с1}$, мм	рис. 10-17	19	37
49	$B_{с.п}$, Тл	(10-13)	$\frac{1,2\cdot7,43\cdot10^{-3}}{2\,(155+40)\,17}\,10^6=1,345$	$\frac{1,2\cdot32,16\cdot10^{-3}}{2\,(300+80)\,34}\,10^6=1,493$
50	$B_{с.п.доп}$, Тл	§ 10-3	1,7	1,7
51	D_1, мм	(10-14)	$308-2\cdot17=274$	$544-2\cdot34=476$
52	$h_п$, мм	(10-15)	$\frac{274-4\cdot1,6-160}{2}=53,8$	$\frac{476-4\cdot2,7-290}{2}=87,6$
53	$h_д$, мм	(10-16)	$\frac{274-4\cdot3,3-160}{2}=50,4$	$\frac{476-4\cdot5,4-290}{2}=82,2$

На длину станины l_1 влияет выбранная форма подшипниковых щитов — глубокие, мелкие или плоские. Минимальная длина станины должна быть такой, чтобы станина перекрывала лобовые части катушек главных и добавочных полюсов, а также соединения компенсационной обмотки.

При $2p=2$ длина станины $l_1 \approx l_2+0{,}5\tau$, при $2p=4$ длина станины $l_1 \approx l_2+0{,}65\tau$; высота станины (мм)

$$h_{c1}=\sigma\Phi' \cdot 10^6/(2k_c l_1 B'_{c1}); \quad (10\text{-}12)$$

$k_c=1$ — для монолитной станины; B'_{c1} — предварительная магнитная индукция в станине, Тл:

Исполнение машины	IP22; IC01	IP22; IC17	IP44; IC37	IP44; IC0141	IP44; IC0041
Магнитная индукция B'_{c1}, Тл	1,2—1,3			1,1—1,2	1—1,1

Для шихтованных станин значение B_{c1} может быть увеличено до 1,5 Тл.

Для проверки приемлемости полученного значения h_{c1} на рис. 10-17 приведены средние значения h_{c1}, применяемые на практике. Магнитная индукция в месте распространения магнитного потока в станине при входе его в главный полюс

$$B_{c.п}=\sigma\Phi' \cdot 10^6/[2(l_п+b_п)h_{c1}]. \quad (10\text{-}13)$$

Если значение $B_{c.п}>1{,}7$ Тл, то h_{c1} увеличивают.

Внутренний диаметр монолитной станины или шихтованного сердечника станины (мм)

$$D_1=D_{н1}-2h_{c1}. \quad (10\text{-}14)$$

Высота главного и добавочного полюсов (мм)

$$h_п=(D_1-4\delta-D_{н2})/2; \quad (10\text{-}15)$$

$$h_д=(D_1-4\delta_д-D_{н2})/2, \quad (10\text{-}16)$$

где 4δ или $4\delta_д$ учитывает кроме двух воздушных зазоров необходимость расположения стальных прокладок между станиной и полюсами, предназначенных для регулирования воздушного зазора; в машинах большой мощности ($h \geqslant 355$ мм) эти прокладки между станиной и добавочными полюсами могут выполняться из немагнитного материала, например из латуни.

§ 10-4. Обмотка якоря

Основные положения. Якорь выполняет в машине постоянного тока важную роль при передаче и преобразовании энергии в машине, поэтому определение параметров обмотки якоря требует особой внимательности. Неудачный выбор параметров может отразиться на всех дальнейших этапах расчета и на технико-экономических показателях машины.

Расчет обмотки охватывает следующие основные этапы: определение количества параллельных ветвей и типа обмотки якоря; определение количества пазов, витков и коллекторных пластин,

шагов обмотки, количества и шага уравнительных соединений; расчет размеров пазов и проводов обмотки; определение сопротивления обмотки и длины вылета лобовой части обмотки; проверка уровня удельной тепловой напряженности обмотки от электрических потерь в обмотке.

Типы обмоток. Предварительное значение тока (А) якоря у двигателей

$$I_2 = k_т P_2/(\eta U); \quad (10\text{-}17)$$

у генераторов

$$I_2 = (2 - k_т) P_2/U, \quad (10\text{-}18)$$

где P_2 — номинальная отдаваемая мощность, Вт.

Тип обмотки якоря, определяемый количеством главных полюсов $2p$ и током якоря I_2, принимают по табл. 10-7.

Таблица 10-7

Тип обмотки	Количество полюсов $2p$	Ток I_2, А
Простая петлевая	2	—
Простая волновая	4	До 700
Простая петлевая или лягушечья	4	Свыше 400 до 1600
Двухходовая петлевая или лягушечья	4	Свыше 1300

При выборе петлевой или лягушечьей обмотки следует учитывать, что для быстроходных машин (окружная скорость якоря $v_2 > 40$ м/с) и для машин, работающих с высокими перегрузками ($I_{max}/I_н > 2$), более целесообразно применение лягушечьей, а для остальных машин — петлевой обмотки. Окружная скорость якоря (м/с)

$$v_2 = \pi D_{н2} n/60\,000. \quad (10\text{-}19)$$

Основные свойства разных типов обмотки якоря, в том числе условия симметрии, количество параллельных ветвей $2a$, количество секций, расположенных по ширине паза $N_ш$, количество пазов якоря Z_2 и коллекторных пластин K, обеспечивающих снижение пульсаций магнитного потока и улучшенные коммутационные параметры, а также формулы определения шагов обмотки подробно освещены в [14, 15]. Все рекомендации для машин с $2p=2$ и $2p=4$ приведены в табл. 10-8.

Рассмотрим некоторые особенности обмоток, которые следует учитывать при проектировании машин. Простая петлевая обмотка выполняется равносекционной. Уравнительные соединения первого рода располагают по одному на один или два паза якоря. Площадь поперечного сечения уравнителей составляет около 30% площади поперечного сечения эффективного проводника. У машин

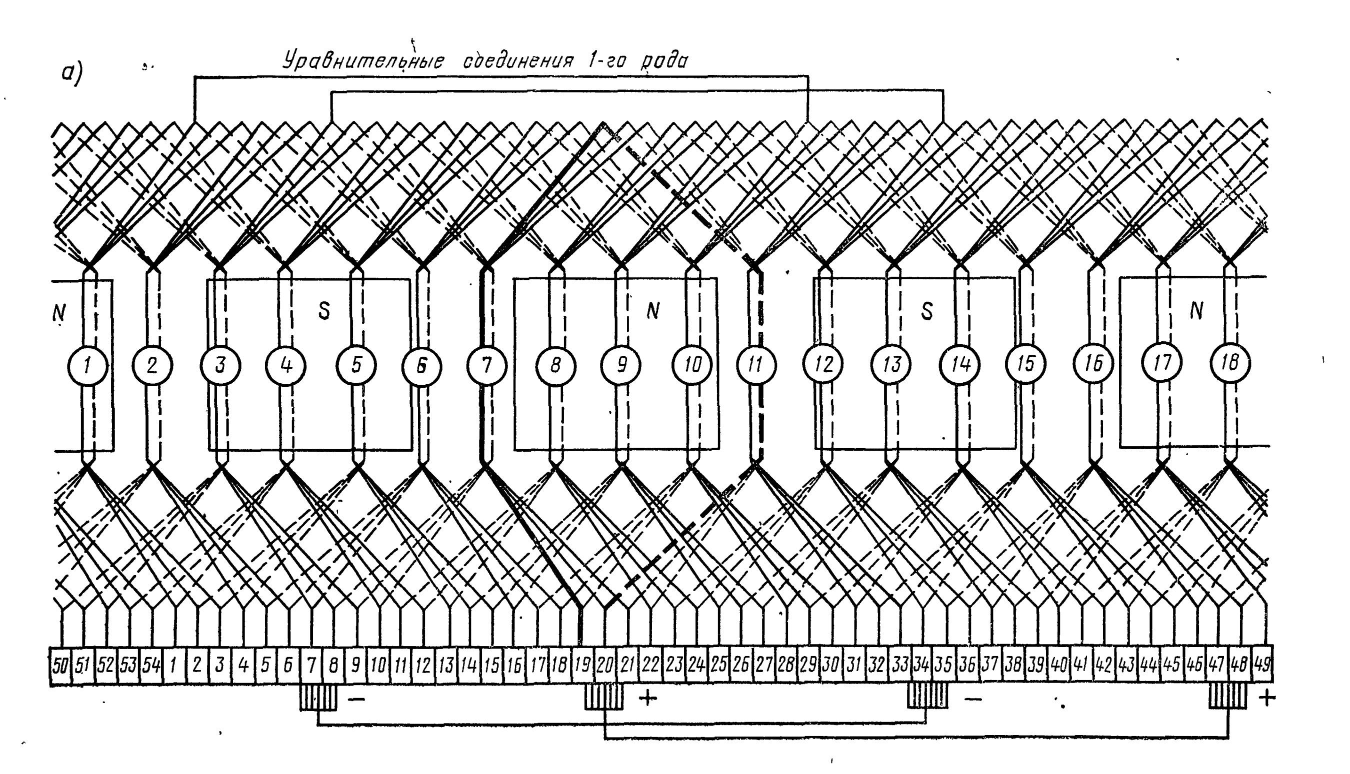


Рис. 10-18. Развернутые схемы обмоток якоря:

а — простая петлевая равносекционная $2p=4$; $2a=4$; $Z=18$; $K=54$; $N_{ш}=3$; $y_{п}=4$; $y_1=12$; $y_к=y=1$; $y_2=11$; $y_{ур1}=27$



Рис. 10-18 (продолжение):
б — простая волновая равносекционная: $2p=4$; $2a=2$; $Z=13$; $K=34$; $N_{ш}=3$; $y_п=3$; $y_1=9$; $y_к=y=19$; $y_2=10$

с $2p=2$ надобность в уравнительных соединениях отпадает. На рис. 10-18,*а* приведена развернутая схема равносекционной простой петлевой обмотки с уменьшенным числом пазов и коллекторных пластин.

Двухходовая петлевая обмотка, выполняемая двукратнозамкнутой, ступенчатой (для улучшения коммутационных параметров), имеет уравнительные соединения как первого, так и второго рода. Число уравнительных соединений первого рода должно быть не менее одного на две-три коллекторные пластины. Соотношение площадей поперечного сечения уравнительных соединений и эффективных проводников такое же, как у простой петлевой обмотки.

Простая волновая обмотка обычно выполняется равносекционной; у машин с $h \geqslant 355$ мм для улучшения коммутации применяют ступенчатую обмотку. В отдельных случаях используют несимметричную равносекционную обмотку с «мертвой» секцией, которая не присоединяется к коллектору. Такое исполнение в машинах мощностью до 100 кВт и при $K > 100$ не ухудшает коммутации. На рис. 10-18,*б* приведена для примера развернутая схема равносекционной простой волновой обмотки с уменьшенным числом пазов и коллекторных пластин.

Лягушечья обмотка имеет одинаковое число параллельных ветвей в составляющих ее петлевой и волновой обмотках, поэтому

Таблица 10-8

Тип обмотки	$2p$	$2a$	$Z_э$	K	$Z_э/p$	K/p	$N_ш$	$y_п$	$y=y_к$	y_1	y_2	$y_{ур1}$	$y_{ур2}$
Простая петлевая равносекционная	2	2	Четное	Четное	Четное	Четное или нечетное	2; 3; 4; 5	$Z_э/2-1$	± 1	$N_ш y_п$	y_1-y	—	—
	4	4	$4N+2$	»	Нечетное	Нечетное	3; 5	$Z_э/2p\mp\varepsilon=$ целое число	± 1	$N_ш y_п$	y_1-y	K/p	—
Двухходовая петлевая ступенчатая	4	8	Четное	Четное	Четное	Четное	2; 3; 4	Ступенчатое	± 2	$K/2p\mp 1$	$K/2p\pm 1$	K/p	K/p
Простая волновая равносекционная	4	2	Нечетное	Нечетное	Дробное с половиной	Дробное с половиной	3; 5	$Z_э/2p\mp\varepsilon=$ целое число	$\frac{K\mp 1}{p}$	$N_ш y_п$	$y-y_1$	—	—
Простая волновая ступенчатая	4	2	Нечетное	Нечетное	Дробное с половиной	Дробное с половиной	3; 5	Ступенчатое	$\frac{K\mp 1}{p}$	$K/2p\mp\varepsilon=$ целое число	$y-y_1$	—	—
Лягушечья равносекционная разрезная: петлевая	4	$4m$	Четное	Четное	Нечетное	Нечетное	3; 5	$Z_э/2p\mp\varepsilon=$ целое число	$\mp m$	$N_ш y_п$	$N_ш y_п\mp m$	—	—
Лягушечья равносекционная разрезная: волновая		$4m$						$Z_э/2p\mp\varepsilon$	$K/p\mp m$	$K/p-N_ш y_п$	$N_ш y_п\mp m$	—	—

Примечания: 1. y_1 и y_2 — первый и второй частичные шаги по элементарным пазам; y — результирующий шаг по элементарным пазам; $y_п$ — шаг по реальным пазам; $y_{ур1}$ и $y_{ур2}$ — шаги уравнительных соединений первого и второго рода соответственно; ε — укорочение шага обмотки; m — количество ходов обмотки.

2. В выражениях для y_1 и y_2 двухходовой петлевой ступенчатой обмотки знаки перед единицей должны быть разными.

3. В выражениях для $y_п$ петлевой и волновой обмоток, составляющих лягушечью, знаки перед ε должны быть разными; в выражениях для $y=y_к$ указанных обмоток знаки перед m также должны быть разными.

4. Здесь N — любое целое число.

волновую обмотку выполняют многоходовой однократнозамкнутой. Площади поперечного сечения проводников каждой из обмоток одинаковые. Проводники располагают в четыре слоя по высоте паза: крайние принадлежат волновой, а средние — петлевой обмотке. К каждой коллекторной пластине присоединяют четыре эффективных проводника — два от петлевой и два от волновой обмотки.

При расчете лягушечьей обмотки целесообразно рассматривать ее как петлевую с двумя параллельными проводами по высоте паза; при этом условия выполнимости, расчет шагов и конструкция изоляции должны соответствовать лягушечьей обмотке.

Количество витков обмотки и коллекторных пластин. Предварительное количество витков обмотки якоря

$$w'_2 = 30k_{\text{н}}U/[(p/a)n\Phi']. \tag{10-20}$$

Для лягушечьей обмотки значение w'_2 соответствует числу витков каждой из составляющих обмоток — петлевой и волновой.

Предварительное количество витков в секции для машин с полузакрытыми пазами якоря

$$w'_{\text{с}2} \approx 1{,}8w'_2/D_{\text{н}2}. \tag{10-21}$$

Полученное значение $w'_{\text{с}2}$ может быть целым числом или целым числом с дробью, так как всыпная обмотка из круглых проводов допускает разное число витков в секциях, расположенных в одном пазу. Например, при трех секциях в пазу ($N_{\text{ш}}=3$) и числе витков в секциях *4—5—4* среднее значение $w_{\text{с}2}=4^{1/3}$.

У машин с открытыми пазами якоря и обмоткой из прямоугольных проводов предварительное значение

$$w'_{\text{с}2} \approx 2{,}3w'_2/D_{\text{н}2}. \tag{10-22}$$

Полученное число округляют до ближайшего целого значения $w_{\text{с}2}$.

Предварительное количество пазов якоря

$$Z'_2 = w'_2/(N_{\text{ш}}w_{\text{с}2}), \tag{10-23}$$

где $N_{\text{ш}}$ принимают в зависимости от $2p$ и типа обмотки из табл. 10-8; Z'_2 — округляют до ближайшего значения Z_2, удовлетворяющего условиям той же таблицы.

Количество коллекторных пластин

$$K = N_{\text{ш}}Z_2. \tag{10-24}$$

При выборе $N_ш$ и Z_2 следует учитывать, что зубцовое деление по наружному диаметру якоря (мм)

$$t_2 = \pi D_{н2}/Z_2 \tag{10-25}$$

не должно выходить за пределы:

Высота оси вращения h, мм	80—200	225—315	355—500
Зубцовое деление t_2, мм	10—20	15—35	18—40

Меньшие значения t_2 соответствуют меньшим h.

Наружный диаметр коллектора связан с наружным диаметром якоря и конструкцией коллектора (с петушками или без петушков). Коллекторы без петушков применяют в якорях с полузакрытыми пазами в тех случаях, когда концы проводов обмотки могут быть заложены в канавки, выфрезерованные в пластинах коллектора. Возможность эта определяется величиной произведения $2cd$, которое не должно превышать 9 мм (здесь c — число элементарных проводов в эффективном проводнике; d — диаметр неизолированного провода, мм). При бо́льших значениях этого произведения, а также в якорях с открытыми и прямоугольными проводами применяют коллектор с петушками.

Наружный диаметр коллектора при полузакрытых пазах якоря и отсутствии петушков на коллекторе (мм)

$$D_к \approx (0{,}75—0{,}8) D_{н2}, \tag{10-26}$$

при открытых пазах якоря и наличии петушков на коллекторе (мм)

$$D_к \approx (0{,}65—0{,}7) D_{н2}. \tag{10-27}$$

Диаметр $D_к$ по ГОСТ 19780—74 округляют до ближайшего значения предпочтительного ряда: 56; 63; 71; 80; 90; 100; 112; 125; 140; 160; 180; 200; 224; 250; 280; 315; 355; 400; 450; 500 мм.

Коллекторное деление (мм)

$$t_к = \pi D_к/K. \tag{10-28}$$

Минимально допустимое коллекторное деление $t_{к\min}$ определяется технологией изготовления коллектора:

Диаметр коллектора $D_к$, мм	56—125	160—280	315—500
Коллекторное деление $t_{к\min}$, мм	3,0	3,5	3,8

При значении $t_к < t_{к\min}$ уменьшают количество коллекторных пластин путем увеличения количества витков секции w_{c2}, либо путем перехода на другой тип обмотки якоря с уменьшенным

количеством параллельных ветвей. После этого должно быть проверено максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами при нагрузке (В)

$$U_{\text{кmax}}=2pUk_{\text{и}}/(a'K). \quad (10\text{-}29)$$

Коэффициент искажения поля $k_{\text{и}}$ равен отношению максимальных значений магнитной индукции при нагрузке и при х. х. На это отношение влияет величина и форма воздушного зазора машины, а у двигателя также диапазон регулирования частоты вращения ослаблением поля главных полюсов. Средние значения $k_{\text{и}}=f(n_{\max}/n_{\text{н}})$ двигателей без компенсационной обмотки, имеющих эксцентричный зазор, приведены на рис. 10-19. При наличии компенсационной обмотки $k_{\text{и}}=1$.

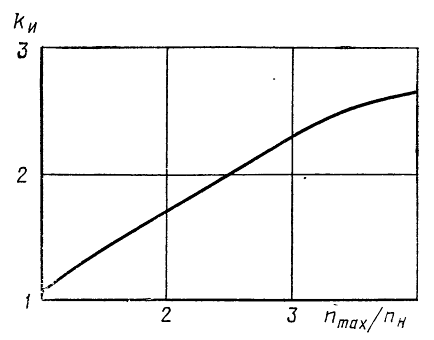


Рис. 10-19. Коэффициент искажения поля $k_{\text{и}}=f(n_{\max}/n_{\text{н}})$ для некомпенсированных двигателей с эксцентричным зазором

Значения $U_{\text{кmax}}$ не должны превышать приведенных ниже:

h, мм . . .	80—100	112—200	225—315	355—500
$2p$	2	4	4	4
$U_{\text{к max}}$, В .	100	50	30	25

После указанной проверки $U_{\text{кmax}}$ уточняют число витков обмотки якоря

$$w_2=w_{\text{c}2}K. \quad (10\text{-}30)$$

Для лягушечьей обмотки w_2 равно количеству витков каждой из соответствующих обмоток.

В пазу количество эффективных проводников

$$N_{\text{п}2}=2N_{\text{ш}}w_{\text{c}2}; \quad (10\text{-}31)$$

ток в пазу (А)

$$I_{\text{п}2\Sigma}=N_{\text{п}2}I_2/(2a). \quad (10\text{-}32)$$

Значение $I_{\text{п}2\Sigma}$ не должно превосходить 1500 А.

Если w_2 отличается от w'_2 более чем на 5%, то корректируют предварительное значение магнитного потока (Вб)

$$\Phi''=\Phi'w'_2/w_2 \quad (10\text{-}33)$$

и магнитной индукции в воздушном зазоре (Тл)

$$B''_\delta=B'_\delta w'_2/w_2. \quad (10\text{-}34)$$

Уточненная линейная нагрузка якоря (А/см)

$$A_2=20w_2I_2/(\pi D_{\text{н}2}2a) \quad (10\text{-}35)$$

Полученное при расчете значение A_2 не должно отличаться от принятого при определении главных размеров более чем на 10%; в ином случае следует применять обмотку якоря с измененным количеством витков.

Обмотка якоря с овальными полузакрытыми пазами. Полузакрытые пазы якоря применяют в основном овальной формы (рис. 10-20). При этом радиусы r_1 и r_2 принимают такими, чтобы стенки зубцов были параллельны ($b_{з2}$=const) на протяжении расстояния h_1. Обеспечиваемое при этом постоянство магнитной индукции $B_{з2}$ по высоте указанного участка зубца уменьшает МДС для зубцов. Примерные значения высот пазов $h_{п2}$ приведены на рис.

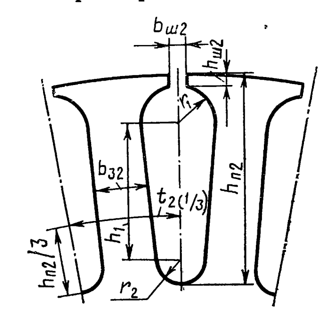


Рис. 10-20. Форма и размеры полузакрытого овального паза якоря

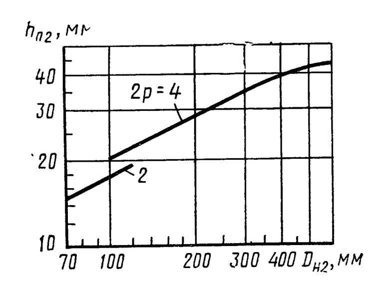


Рис. 10-21. Средние значения $h_{п2}=f(D_{н2})$

10-21. Чем больше принимаемое значение $h_{п2}$, тем меньше высота спинки якоря $h_{с2}$ и соответственно больше магнитная индукция в спинке $B_{с2}$. Если при проверке расчетом предварительное значение $B_{с2}'$ превысит предел, указанный в табл. 10-9, высоту паза $h_{п2}$, принятую из рис. 10-21, снижают.

Таблица 10-9

Степень защиты и способ охлаждения	Количество полюсов $2p$	Магнитная индукция $B_{с2}$ при частоте перемагничивания $f=pn/60$, Гц	
		100—50	менее 50
IP22; IC01	2	1,6	1,7
	4 и более	1,4	1,45
IP44; IC0141	2	1,35	1,4
	4 и более	1,15	1,2
IP44; IC0041	2	1,25	1,3
	4 и более	1,05	1,1

Примечание. Для машин со степенями защиты IP22 и IP44, со способами охлаждения IC17 и IC37 значение $B_{с2}$ принимают, как для машин со степенью защиты IP22 и со способом охлаждения IC01.

Расчет размеров зубцовой зоны (зубцов и пазов) якоря начинают с определения ширины зубца $b_{з2}$, а затем радиусов r_1 и r_2. Для контроля определяют значения $b_{з2}$ (мм), соответствующие вычисленным r_1 и r_2:

$$b_{з2}=\pi(D_{н2}-2h_{ш2}-2r_1)/z_2-2r_1; \qquad (10\text{-}36)$$

$$b_{з2}=\pi(D_{н2}-2h_{п2}+2r_2)/z_2-2r_2. \qquad (10\text{-}37)$$

Значения $b_{з2}$ из этих формул должны быть практически одинаковыми и равными $b_{з2}$ из (10-42).

Для обмоток якорей с полузакрытыми пазами у машин с $h=80\div200$ мм применяют при изоляции класса нагревостойкости В провода марки ПЭТВ, класса F—провода ПЭТ-155, класса Н—провода ПЭТ-200 или ПСДКТ. Диаметр проводов выбирают таким, чтобы коэффициент заполнения паза

$$k_п=N_{п2}c(d')^2/S_{п2}'' \qquad (10\text{-}38)$$

не превышал 0,75.

Здесь d' — диаметр изолированного провода; $S_{п2}''$ — площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой [см. (10-50)]. Количество элементарных проводов в одном эффективном c выбирают, исходя из того, чтобы диаметр провода без изоляции d не превышал 1,68 мм; причина этого ограничения заключается в затруднении с всыпанием проводов большего диаметра в пазы и в связи с этим в повышении возможности замыкания проводов в пазах.

Значения $k_п$ выше 0,75 не следует применять, так как при этом обмотка укладывается в пазы под значительным механическим воздействием, способным повредить изоляцию, что может повлечь за собой к. з. витков обмотки или пробой обмотки на корпус. При малых значениях $k_п$ (менее 0,65), в связи с увеличением плотности тока в пазу, увеличивается температура обмотки. Это может потребовать удлинения сердечников статора и ротора. Кроме того, для уплотнения обмотки в пазу потребуются утолщенные клинья.

Уровень удельной тепловой нагрузки якоря от электрических потерь в обмотке в значительной мере определяет ожидаемое превышение температуры обмотки. Как показано в § 5-4, этот уровень характеризуется произведением линейной нагрузки обмотки на плотность тока в проводах — A_2J_2.

У спроектированной обмотки якоря определяют указанное произведение и сравнивают его со средним допускаемым значением из рис. 10-22. Для машин со способами охлаждения IC01, IC0141 и IC0041 значения A_2J_2 на рисунке соответствуют исполне-

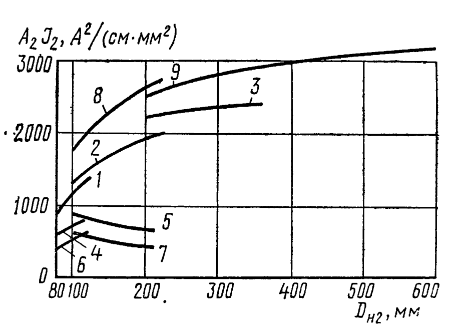


Рис. 10-22. Средние значения $A_2J_2=f(D_{н2})$ при классе нагревостойкости изоляции F:

1 — исполнение по защите IP22, способ охлаждения IC01, полузакрытые пазы якоря, частота вращения 1500 об/мин, число главных полюсов $2p=2$; *2* — то же, что *1*, но $2p=4$; *3* — IP22, IC01, открытые пазы, 1500 об/мин, $2p=4$; *4* — IP44, IC0141, полузакрытые пазы, 1500 об/мин, $2p=2$; *5* — то же, что *4*, но $2p=4$; *6* — IP44, IC0041, полузакрытые пазы, 1500 об/мин, $2p=2$; *7* — то же, что *6*, но $2p=4$; *8* — IP22 или IP44, IC17 или IC37, полузакрытые пазы, все частоты вращения, $2p=4$; *9* — то же, что *8*, но открытые пазы

нию с изоляцией класса нагревостойкости F и с частотой вращения 1500 об/мин. При изоляции классов нагревостойкости В и Н, а также при частотах вращения, отличающихся от 1500 об/мин, принимаемое из рисунка значение A_2J_2 умножают на квадрат коэффициентов k_1^2 и k_4^2, где поправочный коэффициент k_1 (см. табл. 10-4) учитывает влияние на допускаемую удельную тепловую нагрузку изменения допускаемого превышения температуры при классах нагревостойкости изоляции В и Н, а k_4 (см. табл. 10-5) — влияние изменения эффекта охлаждения обмотки при других частотах вращения. У машин со способами охлаждения IC17 и IC37 значения A_2J_2 на рисунке также соответствуют изоляции класса нагревостойкости F; при классах В и Н принимаемое значение A_2J_2 умножают на квадрат коэффициента $k^2{}_1$. Частота вращения при этих способах охлаждения практически не влияет на эффект вентиляции и соответственно на допускаемое значение A_2J_2.

У двигателей со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC06 допускаемое значение A_2J_2 принимают, как при способе охлаждения IC17, а у двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0641, вне зависимости от частоты вращения, как у двигателей со способом охлаждения IC0141 при $n=$ $=1500$ об/мин.

Если полученный при расчете машины показатель A_2J_2 превышает допускаемое значение более чем на 15%, следует повысить площадь поперечного сечения провода, высоту $h_{п2}$ и площадь поперечного сечения паза $S_{п2}''$ с учетом того, чтобы значение $B_{с2}$ не превысило при этом пределов, указанных в табл. 10-9; другим способом является удлинение сердечника якоря — при этом увеличится магнитный поток Φ' и уменьшится количество проводников в пазу, либо количество пазов якоря.

Сопротивление обмотки якоря при $t=20$ °С, вычисленное по (10-58) и выраженное по (10-59) в о. е., сопоставляют (для контроля вычислений) со значением, определяемым по формуле

$$r_{2*}=\pi D_{н2}\, l_{ср2}(A_2J_2)/(114\cdot 10^4 I_2 U). \qquad (10\text{-}39)$$

Размеры овальных полузакрытых пазов и проводов, а также значения сопротивления обмотки якоря определяют в такой последовательности.

Высота паза (мм)	$h_{п2}$ — из рис. 10-21	
Высота спинки якоря (мм)	$h_{с2}=(D_{н2}-D_2)/2-h_{п2}$	(10-40)
Предварительная магнитная индукция в спинке якоря (Тл)	$B'_{с2}=\dfrac{\Phi'\cdot 10^6}{2l_{эф2}h_{с2}}$	(10-41)
То же, допускаемое значение	$B_{с2}$ — из табл. 10-9	
Предварительная магнитная индукция в зубцах (Тл)	$B'_{з2}$ — из табл. 10-10	
Ширина зубца (мм)	$b_{з2}=t_2B'_\delta/(k_cB'_{з2})$	(10-42)
Высота шлица паза (мм)	$h_{ш2}=0{,}8$	
Радиус паза **больший (мм)**	$r_1=\dfrac{\pi(D_{н2}-2h_{ш2})-Z_2b_{з2}}{2(Z_2+\pi)}$	(10-43)

То же, меньший	$r_2 = \dfrac{\pi(D_{н2} - 2h_{п2}) - Z_2 b_{з2}}{2(Z_2 - \pi)}$	(10-44)
Ширина зубца (мм)	$b_{з2}$ — по (10-36)	
То же, контрольное значение	$b_{з2}$ — по (10-37)	
Расстояние между центрами радиусов (мм)	$h_1 = h_{п2} - h_{ш2} - r_1 - r_2$	(10-45)
Площадь поперечного сечения паза в штампе (мм²)	$S_{п2} = \dfrac{\pi}{2}(r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2)h_1$	(10-46)
Площадь поперечного сечения паза в свету (мм²)	$S'_{п2} = \dfrac{\pi}{2}\left[\left(r_1 - \dfrac{b_с}{2}\right)^2 + \left(r_2 - \dfrac{b_с}{2}\right)^2\right] + (r_1 + r_2 - b_с)h_1$	(10-47)
Площадь поперечного сечения корпусной изоляции (мм²)	$S_и = b_и(2\pi r_1 + \pi r_2 + 2h_1)$	(10-48)
То же, клина и прокладок	$S_{кл} + S_{пр} \approx 5r_1$	(10-49)
Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой (мм²)	$S''_{п2} = S'_{п2} - S_и - S_{кл} - S_{пр}$	(10-50)
Предварительный диаметр провода с изоляцией (мм)	$d' = \sqrt{0{,}75 S''_{п2}/(N_{п2}c)}$	(10-51)
Ближайший меньший стандартный диаметр провода с изоляцией и без изоляции (мм)	d'/d — из приложения 1	
Уточненный коэффициент заполнения паза	$k_п$ — по (10-38)	
Площадь поперечного сечения провода без изоляции при принятом диаметре (мм²)	S — из приложения 1	
Плотность тока в обмотке (А/мм²)	$J_2 = I_2/(2acS)$	(10-52)
Удельная тепловая нагрузка якоря от потерь в обмотке [А²/(см·мм²)]	$A_2 J_2$	(10-53)
То же, допустимое значение	$A_2 J_2$ — из рис. 10-22	
Среднее зубцовое деление якоря (мм)	$t_{ср} = \pi(D_{н2} - h_{п2})/Z_2$	(10-54)
Средняя ширина секции обмотки (мм)	$b_{ср} = t_{ср} y_п$	(10-55)
Средняя длина одной лобовой части секции (мм)	$l_{л2} = (0{,}7 + 0{,}4p)b_{ср} + 15$	(10-56)
Средняя длина витка обмотки, мм	$l_{ср2} = 2(l_2 + l_{л2})$	(10-57)
Сопротивление обмотки при температуре 20 °С (Ом)	$r_2 = \dfrac{w_2 l_{ср2}}{57(2a)^2 cS \cdot 10^3}$	(10-58)
То же, в относительных единицах	$r_{2*} = r_2 I_2/U$	(10-59)
То же, контрольное значение	r_{2*} — по (10-39)	
Длина вылета лобовой части обмотки, мм	$l_{в2} = (0{,}12 + 0{,}14p)b_{ср} + 7{,}5$	(10-60)

Здесь $b_и$ — односторонняя толщина корпусной изоляции, равная 0,35 мм (при высоте оси вращения машины $h = 80 \div 112$ мм) и 0,5 мм (при $h = 132 \div 200$ мм).

Таблица 10-10

Степень защиты и способ охлаждения	Предварительные значения магнитной индукции $B'_{з2}$ (Тл) при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	25 и ниже
IP22; IC01	1,75	1,85	1,95	2,0
IP44; IC0141	1,5	1,6	1,65	1,7
IP44; IC0041	1,4	1,5	1,6	1,65

Примечания: 1 Уточненные при дальнейших расчетах значения $B'_{з2}$ не должны превышать указанные в таблице более чем на 10%.

2. Для машин со степенью защиты IP22 и IP44, со способом охлаждения IC17 и IC37 значения $B'_{з2}$ принимают, как для машин со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01.

Корпусную изоляцию паза для удобства намотки якоря выпускают наружу через шлиц паза, поэтому принимают ширину шлица паза (мм)

$$b_{ш2}=d'+2b_{и}+0,3. \qquad (10\text{-}61)$$

Конструкция изоляции обмотки якоря с овальными полузакрытыми пазами приведена в приложении 24.

Обмотка якоря с прямоугольными открытыми пазами. Достоинством прямоугольных открытых пазов якоря (рис. 10-23) является возможность размещения в них проводов прямоугольного поперечного сечения, что значительно повышает коэффициент заполнения пазов медью. При прямоугольных проводах обмотка изготовляется из жестких формованных катушек; такая обмотка обладает большей надежностью, чем всыпная из круглых проводов.

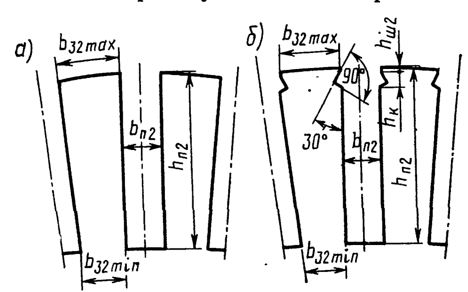


Рис. 10-23. Форма и размеры открытого прямоугольного паза якоря с креплением обмотки:
а — бандажами; б — клиньями

Примерные значения высот пазов $h_{п2}$ приведены на рис. 10-21.

Как и у овальных полузакрытых пазов, определяемое при расчете значение $B_{с2}$ сравнивают с допускаемыми пределами, указанными в табл. 10-9. При превышении указанных пределов необходимо снизить принятую высоту паза $h_{п2}$.

Расчет размеров зубцовой зоны якоря начинают с определения ширины зубца в наиболее узком месте; затем рассчитывают ширину паза.

Для обмоток якорей с прямоугольными открытыми пазами у машин с $h=225\div315$ мм применяют при изоляции класса нагревостойкости B прямоугольные провода марки ПЭТВП, класса F — провода ПЭТП-155, класса H — провода ПЭТП-200 или ПСДКТ. У машин с $h=355\div500$ мм используют при изоляции

классов нагревостойкости B и F прямоугольные провода марки ПСД, класса H — марки ПСДК.

Количество проводников, размещаемых в пазу по высоте, $N_\text{в}=2w_{\text{с}2}$. При $w_{\text{с}2}=1$ и частоте перемагничивания $f \geqslant 15$ Гц эффективные проводники подразделяют по высоте на два элементарных с целью уменьшения добавочных потерь на вихревые токи в проводах обмотки якоря; для таких обмоток $N_\text{в}=4$, а количество элементарных проводов в эффективном $c=2$.

Для лягушечьей обмотки высота элементарного провода является высотой эффективного проводника каждой составляющей обмотки.

Методика сравнения удельной тепловой нагрузки от электрических потерь в обмотке A_2J_2 с допускаемым значением, корректировка допускаемого значения с учетом разных классов нагревостойкости и разных частот вращения, а также способы снижения при необходимости A_2J_2 такие же, как для овальных полузакрытых пазов.

Определение размеров прямоугольных открытых пазов и проводов, а также сопротивления обмотки якоря производят в таком порядке.

Предварительная высота паза (мм)	$h'_{\text{п}2}$ — из рис. 10-21	
Предварительная магнитная индукция в наиболее узком месте зубца (Тл)	$B'_{\text{з}2\max}$ — из табл. 10-11	
Предварительная ширина зубца в наиболее узком месте при отсутствии радиальных вентиляционных каналов (мм)	$b'_{\text{з}2\min} = \dfrac{t_2 B'_\delta}{k_\text{c} B'_{\text{з}2\max}}$	(10-62)
То же, при наличии радиальных вентиляционных каналов	$b'_{\text{з}2\min} = \dfrac{t_2 l_2 B'_\delta}{l_{\text{эф}2} B'_{\text{з}2\max}}$	(10-63)
Высота спинки якоря (мм)	$h_{\text{c}2}$ — по (10-40)	
Предварительная магнитная индукция в спинке якоря (Тл)	$B'_{\text{c}2} = \dfrac{\Phi' \cdot 10^6}{2 l_{\text{эф}2}(h_{\text{c}2} - 2d_{\text{к}2}/3)}$	(10-64)
Предварительная ширина паза в штампе (мм)	$b'_{\text{п}2} = \dfrac{\pi(D_{\text{н}2} - 2h'_{\text{п}2})}{Z_2} - b'_{\text{з}2\min}$	(10-65)
Допустимая ширина провода с витковой изоляцией (мм)	$a'_{\text{доп}} = (b'_{\text{п}2} - 2b_\text{и} - b_\text{c})/N_\text{ш}$	(10-66)
То же, без изоляции	$a_{\text{доп}} = a'_{\text{доп}} - \Delta_\text{п}$	(10-67)
Ближайшая стандартная ширина провода без изоляции и с изоляцией (мм)	a/a' — из приложений 2 и 3	
Допустимая высота провода с витковой изоляцией (мм)	$b'_{\text{доп}} = (h'_{\text{п}2} - h_\text{и} - h_\text{б} - h_\text{c})/N_\text{в}$	(10-68)
То же, без изоляции	$b_{\text{доп}} = b'_{\text{доп}} - \Delta_\text{и}$	(10-69)
Ближайшая стандартная высота провода без изоляции и с изоляцией (мм)	b/b' — из приложений 2 и 3	
Площадь поперечного сечения провода без изоляции (мм²)	S — из приложения 2	
Уточненная ширина паза в штампе (мм)	$b_{\text{п}2} = N_\text{ш} a' + 2b_\text{и} + b_\text{c}$	(10-70)

Уточненная высота паза в штампе	$h_{п2}=N_в b'+h_и+h_б+h_c$	(10-71)
Плотность тока в обмотке (А/мм²)	J_2 — по (10-52)	
Удельная тепловая нагрузка якоря от потерь в обмотке [А²/(см·мм²)]	A_2J_2 — по (10-53)	
То же, допустимое значение	A_2J_2 — из рис. 10-22	
Среднее зубцовое деление якоря (мм)	$t_{ср}$ — по (10-54)	
Средняя ширина секции обмотки (мм)	$b_{ср}$ — по (10-55)	
Средняя длина одной лобовой части обмотки (мм)	$l_{л2}=1{,}2b_{ср}+h_{п2}+40$	(10-72)
Средняя длина витка обмотки (мм)	$l_{ср2}$ — по (10-57)	
Сопротивление обмотки при температуре 20°С, Ом	r_2 — по (10-58)	
То же, в относительных единицах	r_{2*} — по (10-59)	
То же, контрольное значение	r_{2*} — по (10-39)	
Длина вылета лобовой части обмотки, мм	$l_{в2}=0{,}3b_{ср}+\frac{h_{п2}}{2}+20$	(10-73)

Здесь $2b_п$ и $h_п$ — общая толщина изоляции в пазу по его ширине и высоте, не учитывающая толщины витковой изоляции и высоты бандажной канавки — из табл. 10-12; $h_б$ — высота бандажной канавки, равная 2 мм при высоте оси вращения машины $h=225$ мм, 3 мм при $h=250$ и 280 мм, 3,5 мм при $h=315$ мм; для машин с $h=355\div500$ мм, у которых обмотка крепится клиньями, вместо $h_б$ подставляют сумму высоты клина $h_к=4$ мм и высоты шлица $h_ш=1$ мм; $\Delta_и$ — двусторонняя толщина изоляции провода; для проводов марок ПЭТВП, ПЭТП-155 и ПЭТП-200 $\Delta_и=0{,}15$ мм, для проводов марок ПСД, ПСДК и ПСДКТ $\Delta_и$ определяют из приложения 3; $N_ш$ и $N_в$ — число проводов по ширине и высоте паза.

Таблица 10-11

Степень защиты	Способ охлаждения	Магнитная индукция $B'_{з2\,max}$ (Тл) при частоте перемагничивания, Гц			
		100	75	50	25 и ниже
IP22	IC01	2,0	2,1	2,2	2,3
IP44	IC0141	1,7	1,8	1,9	2,0
IP44	IC0041	1,6	1,7	1,8	1,9

Примечание. См. примечания к табл. 10-12.

Таблица 10-12

Высота оси вращения h, мм	Класс нагревостойкости изоляции	Толщина изоляции						
		по ширине $2b_и$ при $N_ш$				по высоте $h_и$ при $w_{с2}$		
		2	3	4	5	1	2	3
225—315	B; F; H	1,7	1,7	1,7	1,7	4,8	5,1	5,4
355—500	B	2,14	2,14	2,44	2,54	6,24	6,24	—
	F; H	2,1	2,1	2,3	2,3	5,8	5,8	—

Конструкция изоляции обмотки якоря с прямоугольными открытыми пазами приведена в приложениях 25 и 26.

3. Обмотка якоря

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
	Тип и шаги обмотки якоря. Количество витков обмотки, коллекторных пластин, пазов			
54	I_2, А	(10-17)	$0,978 \cdot 5500/(0,82 \cdot 220) = 29,8$	$0,99 \cdot 75\,000/(0,905 \cdot 220) = 372,9$
	Принимаем волновую обмотку (табл. 10-7) из провода ПЭТ-155 (двигатель № 1) и ПЭТП-155 (двигатель № 2)			
55	2α	табл. 10-8	2	2
56	w'_2	(10-20)	$\frac{30 \cdot 0,915 \cdot 220}{2/1 \cdot 1500 \cdot 7,43 \cdot 10^{-3}} = 271$	$\frac{30 \cdot 0,94 \cdot 220}{2/1 \cdot 1000 \cdot 32,16 \cdot 10^{-3}} = 96,5$
57	$N_ш$	табл. 10-8	3	3
58	w_{c2}	(10-21)	$1,8 \cdot 271/160 = 3,05$	—
59	w'_{c2}	(10-22)	—	$2,3 \cdot 96,5/290 = 0,77$
60	w_{c2}	§ 10-4	3	1
61	Z'_2	(10-23)	$271/(3 \cdot 3) = 30,1$	$96,5/(3 \cdot 1) = 32,2$
62	Z_2	табл. 10-8	29	33
63	K	(10-24)	$3 \cdot 29 = 87$	$3 \cdot 33 = 99$
64	t_2, мм	(10-25)	$\pi \cdot 160/29 = 17,32$	$\pi \cdot 290/33 = 27,59$
65	$D_к$, мм	(10-26)	$0,77 \cdot 160 \approx 125$	—
66	$D_к$, мм	(10-27)	—	$0,69 \cdot 290 \approx 200$
67	$t_к$, мм	(10-28)	$\pi \cdot 125/87 = 4,51$	$\pi \cdot 200/99 = 6,34$
68	$U_{к\,max}$, А	(10-29)	$\frac{4 \cdot 220 \cdot 1,7}{0,62 \cdot 87} = 27,7$	$\frac{4 \cdot 220 \cdot 1,7}{0,653 \cdot 99} = 23,1$
69	$U_{к\,max}$, А	§ 10-4	50	30
70	w_2	(10-30)	$3 \cdot 87 = 261$	$1 \cdot 99 = 99$
71	$N_{п2}$	(10-31)	$2 \cdot 3 \cdot 3 = 18$	$2 \cdot 3 \cdot 1 = 6$
72	$I_{п2\Sigma}$, А	(10-32)	$18 \cdot 29,8/2 = 268$	$6 \cdot 372,4/2 = 1117$
73	A_2, А/см	(10-35)	$\frac{20 \cdot 261 \cdot 29,8}{\pi \cdot 160 \cdot 2} = 154,8$	$\frac{20 \cdot 99 \cdot 372,9}{\pi \cdot 290 \cdot 2} = 405,4$
74	$y_п$, реальные пазы	табл. 10-8	$29/4 - 1/4 = 7$	$33/4 - 1/4 = 8$
75	$y - y_к$, элементарные пазы	табл. 10-8	$(87-1)/2 = 43$	$(99-1)/2 = 49$
76	y_1, то же	табл. 10-8	$3 \cdot 7 = 21$	$3 \cdot 8 = 24$
77	y_2, то же	табл. 10-8	$43 - 21 = 22$	$49 - 24 = 25$
78	$h_{п2}$, мм	рис. 10-21	25	34
79	h_{c2}, мм	(10-40)	$(160-50)/2 - 25 = 30$	$(290-90)/2 - 34 = 66$
	Обмотка якоря с овальными полузакрытыми пазами			
80	B'_{c2}, Тл	(10-41)	$\frac{7,43 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 147,2 \cdot 30} 10^5 = 0,841$	—
81	B_{c2}, Тл	табл. 10-9	1,15	—
82	$B'_{з2}$, Тл	табл. 10-10	1,65	—
83	$b_{з2}$, мм	(10-42)	$17,32 \cdot 0,615/(0,95 \times 1,65) = 6,8$	—

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
84	r_1, мм	(10-43)	$\frac{\pi(160-2\cdot 0,8)-29\cdot 6,8}{2(29+\pi)} \approx$ $\approx 4,7$	—
85	r_2, мм	(10-44)	$\frac{\pi(160-2\cdot 25)-29\cdot 6,8}{2(29-\pi)} \approx$ $\approx 2,9$	—
86	$b_{з2}$, мм	(10-36)	$\frac{\pi(160-2\cdot 0,8-2\cdot 4,7)}{29} -$ $-2\cdot 4,7=6,73$	—
87	$b_{з2}$, мм	(10-37)	$\frac{\pi(160-2\cdot 25+2\cdot 2,9)}{29} -$ $-2\cdot 2,9=6,73$	—
88	h_1, мм	(10-45)	$25-0,8-4,7-2,9=16,6$	—
89	$S_{п2}$, мм^2	(10-46)	$\frac{\pi}{2}(4,7^2+2,9^2)+$ $+(4,7+2,9)\,16=169,5$	—
90	$S'_{п2}$, мм^2	(10-47)	$\frac{\pi}{2}\left[\left(4,7-\frac{0,2}{2}\right)^2+\right.$ $\left.+\left(2,9-\frac{0,2}{2}\right)^2\right]+$ $+(4,7+2,9-0,2)\,16=$ $=163,9$	—
91	$S_и$, мм^2	(10-48)	$0,5\,(2\pi\cdot 4,7+\pi\cdot 2,9+$ $+2\cdot 16)=35,3$	—
92	$S_{кл}+S_{пр}$, мм^2	(10-49)	$5\cdot 4,7=23,5$	—
93	$S''_{п2}$, мм^2	(10-50)	$163,9-35,3-23,5=105,1$	—
94	d', мм	(10-51)	$\sqrt{0,75\cdot 105,1/(18\cdot 2)}=$ $=1,48$	—
95	d/d', мм	приложение 1	$1,4/1,485$	—
96	$k_п$	(10-38)	$18\cdot 2\cdot 485^2/105,1=0,755$	—
97	S, мм^2	приложение 1	$1,539$	—
98	J_2, А/мм^2	(10-52)	$29,8/(2\cdot 2\cdot 1,539)=4,84$	—
99	A_2J_2, $A^2/(см/мм)^2$	(10-53)	$154,8\cdot 4,84=749$	—
100	A_2J_2, $А^2/(см/мм^2)$	рис. 10-22	740	—
101	$t_{ср}$, мм	(10-54)	$\pi(160-25)/29=14,62$	—
102	$b_{ср}$, мм	(10-55)	$14,62\cdot 7=102,3$	—
103	$t_{л2}$, мм	(10-56)	$(0,7+0,4\cdot 2)\,102,3+$ $+15=168$	—

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
104	$l_{ср2}$, мм	(10-57)	$2(155+168)=646$	—
105	r_2, Ом	(10-58)	$\frac{261 \cdot 646}{57 \cdot 2^2 \cdot 2 \cdot 1,539 \cdot 10^3}=0,24$	—
106	r_{2*}, о. е.	(10-59)	$0,24 \cdot 29,8/220=0,0325$	—
107	r_{2*}, о. е.	(10-39)	$\frac{\pi \cdot 160 \cdot 646 \cdot 749}{114 \cdot 10^4 \cdot 29,8 \cdot 220}=$ $=0,0325$	—
108	$l_{в2}$, мм	(10-60)	$(0,12+0,14 \cdot 2)\,102,3+$ $+7,5=48,4$	—
109	$b_{ш2}$, мм	(10-61)	$1,485+2 \cdot 0,5+0,3=2,8$	—
	Обмотка якоря с прямоугольными открытыми пазами			
110	$B'_{з2\,max}$, Тл	табл. 10-11	—	2,2
111	$b'_{з2\,min}$, мм	(10-62)	—	$27,59 \cdot 0,72/(0,95 \cdot 2,2)=$ $=9,5$
112	B'_{c2}, Тл	(10-64)	—	$\frac{32,16 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 285\,(66-2 \cdot 18/3)} \times$ $\times 10^6=1,04$
113	B_{c2}, Тл	табл. 10-9	—	1,45
114	$b'_{п2}$, мм	(10-65)	—	$\frac{\pi\,(290-2 \cdot 34)}{33}-9,5=$ $=11,6$
115	$a'_{доп}$, мм	(10-66)	—	$(11,6-1,7-0,3)/3=3,2$
116	$a_{доп}$, мм	(10-67)	—	$3,2-0,15=3,05$
117	a/a', мм	приложения 2 и 3	—	3/3,15
118	$b'_{доп}$, мм	(10-68) табл. 10-12	—	$(34-4,8-3,0-0,3)/4=$ $=6,47$
119	$b_{доп}$, мм	(10-69)	—	$6,47-0,15=6,32$
120	b/b', мм	приложения 2 и 3	—	6,3/6,45
121	S, мм²	приложение 2	—	18,35
122	$b_{п2}$, мм	(10-70)	—	$3 \cdot 3,15+1,7+0,3 \approx 11,5$
123	$h_{п2}$, мм	(10-71)	—	$4 \cdot 6,45+4,8+3,0+0,3 \approx$ ≈ 34
124	J_2, А/мм²	(10-52)	—	$372,9/(2 \cdot 2 \cdot 18,35)=5,08$
125	$A_2 J_2$, А²/(см·мм²)	(10-53)	—	$405,4 \cdot 5,08=2060$
126	$A_2 J_2$, А²/(см·мм²)	рис. 10-22	—	2350

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
127	$t_{ср}$, мм	(10-54)	—	$\pi(290-34)/33=24,36$
128	$b_{ср}$, мм	(10-55)	—	$24,36\cdot 8=194,9$
129	$l_{л2}$, мм	(10-72)	—	$1,2\cdot 194,9+34+40=308$
130	$l_{ср2}$, мм	(10-57)	—	$2(300+308)=1216$
131	r_2, Ом	(10-58)	—	$\frac{99\cdot 1216}{57\cdot 22\cdot 2\cdot 18,35\cdot 10^3}=$ $=0,014$
132	r_{2*}, о. е.	(10-59)	—	$0,014\cdot 372,9/220=0,024$
133	r_{2*}, о. е.	(10-39)	—	$\frac{\pi\cdot 290\cdot 1216\cdot 2060}{114\cdot 10^4\cdot 372,9\cdot 220}=$ $=0,024$
134	$l_{в2}$, мм	(10-73)	—	$0,3\cdot 194,9+34/2+20=95$

Общие положения. Поперечная МДС якоря, возникающая при прохождении тока по обмотке якоря, взаимодействует с МДС обмотки возбуждения главных полюсов (реакция якоря) деформируя, а при насыщенной магнитной цепи — также ослабляя поле главных полюсов. Чем больше нагрузка якоря, тем значительнее уменьшение магнитного потока. В двигателях с относительно небольшим падением напряжения в обмотках якорной цепи указанное уменьшение Ф может вызвать неустойчивость скоростной характеристики, т. е. повышение частоты вращения при увеличении нагрузки. На уменьшение Ф также влияет, но в меньшей мере МДС, создаваемая коммутационными токами в короткозамкнутых секциях.

При работе двигателей в системе автоматического регулирования устойчивость скоростной характеристики может быть обеспечена элементами этой системы. У других двигателей размагничивающее действие МДС якоря может быть компенсировано применением стабилизирующей последовательной обмотки главных полюсов, однако введение такой обмотки требует в случае реверса двигателя переключения выводов стабилизирующей обмотки, по которой протекает ток якоря. Уменьшению размагничивающего действия МДС содействует применение в машинах эксцентричного зазора.

При деформации кривой поля также повышается максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами

$U_{к\,max}$, в результате чего может усилиться искрение на коллекторе и возникнуть круговой огонь. Наиболее радикальным способом компенсации МДС якоря и ликвидации предпосылок к образованию кругового огня является применение в машинах компенсационной обмотки, размещаемой в пазах наконечников главных полюсов. Однако при этом усложняется конструкция машины и ее стоимость. Компенсационную обмотку применяют главным образом в машинах с $h \geqslant 355$ мм, работающих с большими кратковременными перегрузками и в широком диапазоне регулирования частоты вращения путем изменения тока в обмотках возбуждения главных полюсов.

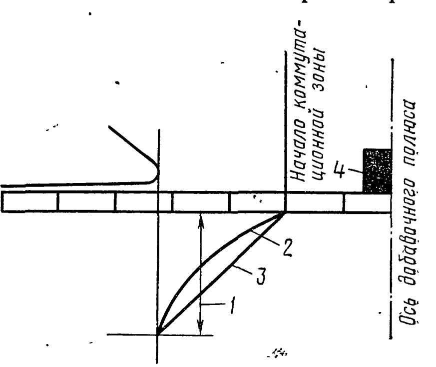


Рис. 10-24. К определению фактора коммутационной стойкости:

1 — потенциал на коллекторе, соответствующий набегающему краю полюса; *2* — потенциальная кривая (действительная); *3* — принимаемая потенциальная кривая; *4* — щетка

Критерии необходимости применения компенсационной обмотки. При определении необходимости применения компенсационной обмотки учитывают, что в качестве основных показателей коммутационной надежности машин постоянного тока с тяжелым режимом работы следует принимать не только среднюю величину реактивной ЭДС короткозамкнутой секции и максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами, но также потенциальную напряженность коллектора в зоне набегающего края полюса. Чем круче фронт потенциальной кривой в указанной зоне, тем больше вероятность возникновения кругового огня. Критерием крутизны является градиент потенциала в зоне набегающего края полюса, именуемый фактором коммутационной стойкости.

Как показано в [3], если для упрощения принять прямолинейное изменение напряжения между соседними коллекторными пластинами в промежутке между краем полюса и началом коммутационной зоны (рис. 10-24), то фактор коммутационной стойкости (В/мм)

$$g_k = 1,15 \frac{pU}{\alpha' K} \left(1 + \frac{\alpha' F_2}{F_п + F_{пос}}\right) \frac{\delta}{\delta''} \frac{K_п + 1}{t_к (2K_п + N_ш - 1 + \varepsilon_к)}. \quad (10\text{-}74)$$

Здесь

$$K_п = 0,5[(1-\alpha')K/2p - (N_ш - 1 + \gamma + \varepsilon_к)]; \quad (10\text{-}75)$$

γ — количество перекрытых щеткой коллекторных делений; предварительно принимаем $\gamma = N_ш$.

Поперечная МДС якоря (А)

$$F_2 = w_2 I_2 / (2p \cdot 2a). \quad (10\text{-}76)$$

В (10-74) подставим значение F_2, соответствующее максимальной кратковременной перегрузке, а $(F_п + F_{пос})$ — макси-

мальной частоте вращения при регулировании ослаблением поля главных полюсов. Значения $F_п+F_{пос}$ при $2p=4$ предварительно можно принять:

$n_{max}/n_н$	1,0	1,5	2	3	4	5
$F_п+F_{пос}$	$13D_{н2}$	$6,2D_{н2}$	$4,5D_{н2}$	$3D_{н2}$	$2,2D_{н2}$	$1,8D_{н2}$

Укорочение шага обмотки, выраженное количеством коллекторных делений,

$$\varepsilon_к=K/(2p)-y_1. \quad (10\text{-}77)$$

Исследование коммутационных параметров построенных электрических машин показало, что для обеспечения высокой стойкости против возможного возникновения кругового огня значение $g_к$ у машин, не подвергающихся тряске, не должно превышать 1,8 В/мм; если $g_к>1,8$, то необходимо применение компенсационной обмотки. Для повышения коммутационной надежности машин компенсационная обмотка может быть применена и при $g_к<$ $<1,8$ В/мм.

Устройство и типы обмотки. Компенсационная обмотка соединяется с обмоткой якоря последовательно и таким образом, чтобы МДС обеих обмоток были направлены навстречу друг другу. Последовательное соединение компенсационной обмотки с обмоткой якоря обеспечивает автоматичность компенсации МДС якоря при изменении нагрузки. Количество проводников компенсационной обмотки N_1, приходящееся на полюсную дугу, определяют, исходя из того, чтобы МДС компенсационной обмотки одного полюса F_1 была равна или близка по величине поперечной МДС обмотки якоря F'_2, приходящейся на полюсную дугу;

$$F_1=N_1I_2/(2a_1); \quad (10\text{-}78)$$

$$F'_2=b_{н.п}A_2/20, \quad (10\text{-}79)$$

где a_1 — количество параллельных ветвей компенсационной обмотки.

Степень компенсации МДС F'_2 в пределах полюсной дуги

$$k_к=F_1/F_2'. \quad (10\text{-}80)$$

При $k_к=100\%$ полная компенсация имеет место на протяжении полюсной дуги; за ее пределами остается нескомпенсированной небольшая часть МДС F_2, не оказывающая существенного влияния на величину $U_{к\,max}$.

Количество проводников компенсационной обмотки одного полюса, необходимое для полной компенсации,

$$N_1=2F_2'a_1/I_2. \quad (10\text{-}81)$$

По конструктивным соображениям не всегда удается выполнить условие 100%-ной компенсации. В этих случаях можно несколько (на $\pm15\%$) отступать от указанного условия.

При токе якоря $I_2>1000\div1500$ А применяют стержневую компенсационную обмотку с прямоугольными полузакрытыми па-

зами (рис. 10-25,*а*). Проводники обмотки выполняют из медных стержней прямоугольного поперечного сечения и соединяют между собой дугами посредством пайки; если станина разъемная, то в местах разъема вместо пайки используют болтовые соединения.

Для лучшего охлаждения, а также более равномерного распределения МДС F_1 в полюсном наконечнике, объем тока $I_{п1\Sigma}$ в пазу ограничивают 2500 А. Для выполнения этого условия может возникнуть необходимость соединения компенсационной обмотки в две параллельные ветви ($a_1=2$), а в некоторых случаях параллельного соединения стержней, расположенных в соседних пазах. При двух параллельных ветвях компенсационной обмотки в каждую ветвь должны входить полюсы одноименной полярности. Больше двух параллельных ветвей применять нецелесообразно, так как при этом может возникнуть неравномерное распределение токов между ветвями.

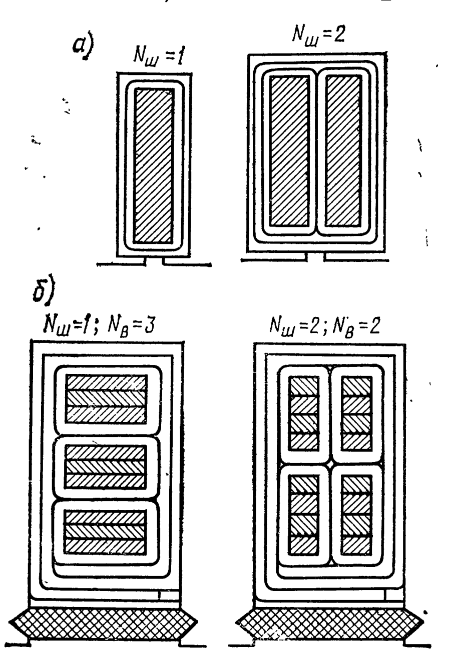


Рис. 10-25. Стержневая (*а*) и секционная (*б*) компенсационные обмотки

При необходимости укладки в пазу нескольких проводников в машинах с $2p=4$ и $I_2\leqslant1000$ А применяют однослойные секционные компенсационные обмотки, укладываемые в открытые пазы (рис. 10-25,*б*). Такие обмотки удобны в производстве и обладают большой надежностью из-за сокращения количества паек в несколько десятков раз. При $I_2<500$ А применяют $a_1=1$, при $I_2\geqslant500$ А—$a_1=2$.

Для приближенной оценки правильности вычислительного сопротивления обмотки r_1 следует учитывать, что r_1 составляет в среднем $(0{,}35\div0{,}7)\,r_2$.

Стержневая обмотка. Предварительное количество пазов на полюс

$$Z_1'=N_1/N_ш, \qquad (10\text{-}82)$$

где $N_ш$ — количество стержней-проводников, расположенных в пазу рядом.

Количество пазов на полюс Z_1' округляют до ближайшего четного числа, которое у машин с $h=355\div500$ мм обычно находится в пределах 6—12. При этом во избежание вибраций, вызываемых колебаниями магнитного потока в зазоре, следует при отсутствии скоса пазов якоря соблюдать условие

$$Z_1\neq(0{,}9\div1{,}1)\,\alpha'Z_2/(2p). \qquad (10\text{-}83)$$

При наличии скоса пазов якоря на одно зубцовое деление соблюдение указанного условия не обязательно.

После выбора Z_1 корректируют значения N_1 и $N_ш$, уточняют МДС F_1, $k_к$ и ток в пазу

$$I_{п1\Sigma}=N_ш I_2/a_1. \qquad (10\text{-}84)$$

В зависимости от $N_ш$ ниже приведены значения $2b_и$ и $h_и$ при стержневой компенсационной обмотке с изоляцией классов нагревостойкости B, F, H:

Количество стержней $N_ш$	1	2
По ширине паза $2b_и$, мм	1,6	2,5
Толщина по высоте паза $h_и$, мм	1,8	2,6

Конструкция изоляции стержневой компенсационной обмотки приведена в приложении 34.

Размеры стержней, пазов и соединительных дуг, а также сопротивление стержневой обмотки определяют в такой последовательности.

Высота шлица полузакрытого паза (мм)	$h_{ш1}=0{,}5$	(10-85)
Зубцовое деление в наиболее узком месте зубцов полюсного наконечника (мм)	$t_{1min}=\dfrac{b_{н.п}}{z_1}\dfrac{D_{н2}+2\delta+2h_{ш1}}{D_{н2}+2\delta}$	(10-86)
Коэффициент магнитного рассеяния наконечников главных полюсов	$\sigma_{н.п}=1{,}05$	(10-87)
Предварительная магнитная индукция в наиболее узком месте зубцов (Тл)	$B'_{з1max}=1{,}7$	(10-88)
Предварительная ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b'_{з1\,min}=\dfrac{t_{1min}B_\delta\sigma_{н.п}}{k_c B'_{з1\,max}}$	(10-89)
Предварительная ширина паза в штампе (мм)	$b'_{п1}=t_{1min}-b'_{з1min}$	(10-90)
Общая толщина изоляции в пазу по его ширине (мм)	$2b_и$ — § 10-5	
Припуск на сборку полюса по ширине паза (мм)	$b_с=0{,}3$	(10-91)
Предварительный меньший размер стержня (мм)	$a'_{ст}=(b'_{п1}-2b_и-b_с)/N_ш$	(10-92)
Принимаемый ближайший стандартный размер стержня (мм)	$a_{ст}$ — из приложения 2	
Предварительная площадь поперечного сечения стержня (мм²)	$S'_{ст}=I_2/(a_1 J'_{ст})$	(10-93)
Предварительный больший размер стержня (мм)	$b'_{ст}=S'_{ст}/a_{ст}$	(10-94)
Принимаемый ближайший стандартный размер стержня (мм)	$b_{ст}$ — из приложения 2	
Площадь поперечного сечения стержня при принятых размерах (мм²)	$S_{ст}$ — из приложения 2	
Уточненная ширина паза в штампе (мм)	$b_{п1}=N_ш a_{ст}+2b_и+b_с$	(10-95)
Общая толщина изоляции в пазу по высоте паза (мм)	$h_и$ — § 10-5	

Припуск на сборку полюса по высоте паза (мм)	$h_с=0{,}3$	(10-96)
Уточненная высота паза в штампе (мм)	$h_{п1}=b_{ст}+h_и+h_ш+h_с$	(10-97)
Уточненная плотность тока в стержне (А/мм²)	$J_{ст}=I_2/(a_1S_{ст})$	(10-98)
Уточненная ширица зубца в наиболее узком месте (мм)	$b_{з1\,min}=t_{1\,min}-b_{п1}$	(10-99)
Уточненная магнитная индукция в наиболее узком месте зубцов (Тл)	$B_{з1\,max}=B'_{з1\,max}\dfrac{b'_{з1\,min}}{b_{з1\,min}}$	(10-100)
Длина стержня (мм)	$l_{ст}=l_п+200$	(10-101)
Предварительный больший размер соединительной дуги (мм)	$b'_{д1}\approx1{,}7b_{ст}$	(10-102)
Принимаемый ближайший стандартный размер дуги (мм)	$b_{д1}$ — из приложения 2	
Предварительная плотность тока в дуге (А/мм²)	$J'_{д1}=0{,}8J'_{ст}$	(10-103)
Предварительная площадь поперечного сечения дуги (мм²)	$S'_{д1}=I_2/(a_1J'_{д1})$	(10-104)
Предварительный меньший размер дуги (мм)	$a'_{д1}=S'_{д1}/b_{д1}$	(10-105)
Принимаемый ближайший стандартный размер дуги (мм)	$a_{д1}$ — из приложения 2	
Площадь поперечного сечения дуги при принятых размерах (мм²)	$S_{д1}$ — из приложения 2	
Уточненная плотность тока в дуге (А/мм²)	$J_{д1}=I_2/(a_1S_{д1})$	(10-106)
Средняя длина дуги (мм)	$l_{ср.д1}=4{,}4D_{н2}/(2p)$	(10-107)
Сопротивление стержней компенсационной обмотки при температуре 20°С (Ом)	$r_{ст}=\dfrac{2pN_1}{57a^2{}_1\cdot10^3}\cdot\dfrac{l_{ст}}{S_{ст}}$	(10-108а)
То же, дуг компенсационной обмотки	$r_{д1}=\dfrac{2pN_1}{57a^2{}_1\cdot10^3}\cdot\dfrac{l_{ср.д1}}{S_{д1}}$	(10-108б)
Общее сопротивление компенсационной обмотки при температуре 20°С	$r_1=r_{ст}+r_{д1}$	(10-108в)

Здесь $J'_{ст}$ — предварительная плотность тока в стержне 5 А/мм² при классе нагревостойкости изоляции В, $J'_{ст}=5{,}6$ А/мм² при классе F и $J'_{ст}=6{,}3$ А/мм² при классе Н. Уточненные ширину и высоту паза округляют до ближайшей десятой доли миллиметра. Принимают ширину шлица паза $b_{ш1}=3$ мм.

Секционная обмотка. Предварительное количество витков обмотки в пазах, приходящихся на полюс, и пазов

$$w_1'=F_2'a_1/I_2; \quad (10\text{-}109)$$

$$Z_1'=2w_1'/w_{с1}, \quad (10\text{-}110)$$

где $w_{с1}$ — количество витков в секции (задаются).

Количество пазов на полюсе Z_1 округляют до ближайшего четного числа, находящегося, как и у стержневой обмотки, в пределах 6—12, соблюдая при этом условие (10-83).

После выбора Z_1 корректируют значение w_1, уточняют МДС

$$F_1=w_1I_2/a_1, \quad (10\text{-}111)$$

степень компенсации $k_к$ по (10-80), а также ток в пазу

$$I_{п1\Sigma}=w_{с1}I_2/a_1. \qquad (10\text{-}112)$$

Эффективные проводники при площади поперечного сечения $S \geqslant 25$ мм² подразделяют на c элементарных проводов (из условий удобства производства размеры провода не должны выходить за пределы 3,28×8 мм). Размещают провода обычно большей стороной по ширине паза.

Количество витков, лежащих рядом в пазу, $N_ш=1$ или 2. Количество витков, расположенных по высоте паза,

$$N_в=w_{с1}/N_ш. \qquad (10\text{-}113)$$

Плотность тока J_1' принимают равной $y_{ст}'$.

Конструкция изоляции секционной компенсационной обмотки приведена в приложении 35.

Размеры проводов и пазов, а также сопротивление секционной обмотки определяют в такой последовательности.

Зубцовое деление в наиболее узком месте зубцов полюсного наконечника (мм)	$t_{1min}=b_{н.п}/Z_1$	(10-114)
Предварительная ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b'_{з1min}$ — по (10-89)	
Предварительная ширина паза в штампе (мм)	$b'_{п1}$ — по (10-90)	
Общая толщина изоляции в пазу по его ширине (мм)	$2b_и$ — из табл. 10-13	
Предварительный больший размер голого проводника (мм)	$b'=(b'_{п1}-2b_и-b_с)/N_ш$	(10-115)
Принимаемый ближайший стандартный размер (мм)	b — из приложения 2	
Предварительная площадь поперечного сечения проводника (мм²)	$S'=I_2/(a_1cJ'_1)$	(10-116)
Предварительный меньший размер проводника (мм)	$a'=S'/b$	(10-117)
Принимаемый ближайший стандартный размер (мм)	a — из приложения 2	
Площадь поперечного сечения проводника при принятых размерах (мм²)	S — из приложения 2	
Уточненная ширина паза в штампе (мм)	$b_{п1}=N_шb+2b_и+b_с$	(10-118)
Общая толщина изоляции в пазу по его высоте (мм)	$h_и$ — из табл. 10-13	
Высота клина (мм)	$h_к=2{,}5$	(10-119)
Высота шлица паза (мм)	$h_{ш1}=1{,}0$	(10-120)
Припуск на сборку полюса по высоте паза (мм)	$h_с=0{,}3$	(10-121)
Уточненная высота паза в штампе (мм)	$h_{п1}=N_вca+h_и+h_к+h_{ш1}+h_с$	(10-122)
Уточненная плотность тока в обмотке (А/мм²)	$J_1=I_2/(a_1cS)$	(10-123)
Уточненная ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b_{з1min}$ — по (10-99)	

Уточненная магнитная индукция в наиболее узком месте зубцов (Тл)	B_{31max} — по (10-100)	
Средняя ширина секции (мм)	$b_{cp}=\pi D_{н2}(1-\alpha'/2)/(2p)$	(10-124)
Длина одной лобовой части витка (мм)	$l_{л1}=1,25b_{cp}+h_{п1}+60$	(10-125)
Средняя длина витка (мм)	$l_{cp1}=2(l_п+l_{л1})$	(10-126)
Сопротивление компенсационной обмотки при температуре 20 °С (Ом)	$r_1=\frac{2pw_1l_{cp1}}{57a^2{}_1cS\cdot 10^3}$	(10-127)
Длина вылета лобовой части обмотки (мм)	$l_{в1}=(0,12+0,14p)b_{cp}+7,5$	(10-128)

Здесь b_c=0,3 мм — припуск на сборку полюса по ширине паза; $h_и$ — общая толщина изоляции в пазу по его высоте (табл. 10-13). Уточненные ширину и высоту паза округляют до ближайшей десятой доли миллиметра.

Таблица 10-13

Класс нагревостойкости изоляции	Значения $2b_и$ (мм) при следующих $N_ш$		Значения $h_и$ (мм) при следующих $N_в$		
	1	2	1	2	3
B	2,22	2,78	3,68	4,24	4,8
F, H	2,5	2,9	3,6	4,0	4,4

§ 10-6. Обмотка добавочных полюсов

Величина МДС катушки добавочного полюса $F_д$ у машин без компенсационной обмотки определяется с учетом необходимости скомпенсировать МДС якоря F_2 в зоне коммутации, а также создать в этой зоне поле, достаточное для индуктирования в коммутируемой секции ЭДС вращения $E_к$, равной и направленной встречно к реактивной ЭДС короткозамкнутой секции $E_р$; соответственно отношение $k_д=F_д/F_2$ должно быть более единицы. Если у машины имеется компенсационная обмотка, то $F_д$ уменьшают на величину МДС компенсационной обмотки F_1.

Для полной компенсации ЭДС $E_р$ необходимо, чтобы кривая ЭДС $E_к$ возможно ближе совпадала по форме с кривой ЭДС $E_р$, однако практически достигнуть этого невозможно, так как кривая ЭДС $E_р$ имеет ступенчатый характер [8]. Поэтому ниже рассматриваются средние за время коммутации значения $E_р$ и $E_к$. Для сохранения пропорциональности между $E_к$ и $E_р$ при изменении нагрузки обмотку добавочных полюсов соединяют с обмоткой якоря последовательно. У машин с $2p\geqslant4$ количество добавочных полюсов $2p_д=2p$; у машин с $2p=2$ обычно применяют один добавочный полюс.

При определении количества витков $w_д$ обмотки у некомпенсированных машин предварительное значение $k'_д=1,4$ (при $2p=2$) и $k'_д=1,25$ (при $2p\geqslant4$); у компенсированных машин $k'_д=(F_д+F_1)/F_2\approx1,3$. Полученные в результате расчета значения $w_д$ округляют до ближайшего целого числа. У некомпенсированных

машин при $I_2 \leqslant 1000$ А катушки добавочных полюсов соединяют последовательно ($a_д=1$); при $I_2>1000$ А — в две параллельные группы ($a_д=2$). Соединение в две параллельные группы бывает также необходимо при малом количестве витков катушки и значительном отклонении величины $k_д$ от рекомендуемой. У компенсированных машин катушки добавочных полюсов и компенсационной обмотки соединяют друг с другом чередуясь; поэтому у таких машин число параллельных ветвей обеих обмоток должно быть одинаковым.

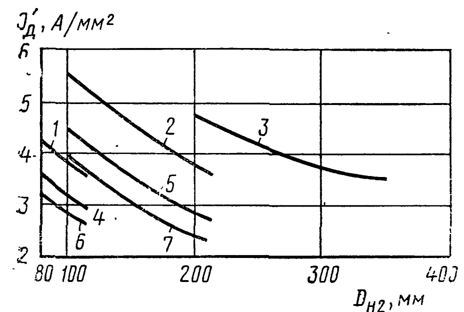


Рис. 10-26. Средние значения $J_д'=f(D_{н2})$ при классе нагревостойкости изоляции F:

1 — исполнение по защите IP22, способ охлаждения IC01, 1500 об/мин, полузакрытые пазы якоря, $2p=2$; *2* — то же, что *1*, но $2p=4$; *3* — IP22, IC01, 1500 об/мин, открытые пазы, $2p=4$; *4* — IP44, IC0141, 1500 об/мин, полузакрытые пазы, $2p=2$; *5* — то же, что *4*, но $2p=4$; *6* — IP44, IC0041, 1500 об/мин, полузакрытые пазы, $2p=2$; *7* — то же, что *6*, но $2p=4$

Предварительные значения плотности тока $J'_д$, в обмотке принимаемые для определения поперечного сечения проводников, приведены на рис. 10-26 для машин с самовентиляцией, с частотой вращения 1500 об/мин и с изоляцией класса нагревостойкости F. Для изоляции класса нагревостойкости В и Н, а также для других частот вращения данные рис. 10-26 умножают на поправочные коэффициенты k_3 (см. табл. 10-4) и k_6 (см. табл. 10-5). Для машин с независимой вентиляцией и с изоляцией класса нагревостойкости F, вне зависимости от частоты вращения, можно принять $J'_д=5-1{,}8 \cdot 10^{-3}\, D_{н2}$ А/мм²; при изоляции классов нагревостойкости В и Н указанное значение $J'_д$ умножают на поправочный коэффициент k_3 (см. табл. 10-4).

В зависимости от площади поперечного сечения S выбирают с целью обеспечения надежности обмотки, форму и марку проводников, а также род выполнения обмотки, указанные в табл. 10-14.

При изолированных проводниках прямоугольного поперечного сечения для удобства намотки катушек размеры выбирают таким образом, чтобы отношение большей стороны к меньшей находилось в пределах 1,4—1,8.

Чтобы избежать возникновения в неизолированной меди трещин при намотке ее на ребро, радиус закругления меди (мм) должен быть больше чем

$$r'=0{,}05b^2/a, \qquad (10\text{-}129)$$

где b — больший размер меди (по ширине катушки); a — меньший размер (по высоте катушки).

Предварительный больший размер меди (мм) при $D_{н2}=180 \div 300$ мм

$$b \approx 0{,}09 D_{н2}, \qquad (10\text{-}130)$$

Таблица 10-14

Сечение S (мм²) и форма	Класс нагревостойкости изоляции	Марка проводника	Род выполнения обмотки добавочных полюсов
До 3 (круглая)	B F H	ПЭТВ ПЭТ-155 ПЭТ-200 ПСДКТ	Многослойные по ширине и по высоте катушки из изолированных проводов круглого поперечного сечения
Свыше 3—8 (круглая)	B F H	ПСД ПСД ПСДК	
Свыше 8—14 (прямоугольная)	B F H	ПЭВП ПЭТП-155 ПЭТП-200 ПСДК	Многослойные по ширине и по высоте катушки из изолированных проводов прямоугольного поперечного сечения
Свыше 14—25 (прямоугольная)	B F H	ПСД ПСД ПСДК	
Свыше 25	B, F, H	Неизолированная шинная медь	Однослойные по ширине катушки из неизолированной меди, намотанной на узкую сторону (на ребро)

при $D_{н2}>300$ мм

$$b\approx 20+0{,}025D_{н2}. \qquad (10\text{-}131)$$

При определении средней длины витка многослойной катушки из изолированных проводов принимают предварительную ширину катушки при $2p_д=1$

$$b'_{к.д}\approx 0{,}27D_{н2}, \qquad (10\text{-}132)$$

при $2p_д\geqslant 4$

$$b'_{к.д}\approx 0{,}12D_{н2}. \qquad (10\text{-}133)$$

В дальнейшем, после вычерчивания эскиза расположения обмоток в междуполюсном окне, ширина может быть уточнена.

Для приближенной оценки правильности вычисленного сопротивления обмотки $r_д$ следует учитывать, что в среднем у некомпенсированных двухполюсных машин $r_д=(0{,}25\div0{,}4)r_2$, а у четырехполюсных $r_д=(0{,}4\div0{,}65)r_2$; у компенсированных машин $r_д=(0{,}15\div0{,}25)r_2$.

Конструкция изоляции обмотки добавочных полюсов приведена в приложениях 31, 32, 33.

Параметры обмотки добавочных полюсов определяют в такой последовательности.

Поперечная МДС якоря (А)	F_2 — по (10-76)	
Предварительное количество витков катушки добавочного полюса у некомпенсированной машины	$w'_д=k'_дF_2a_д/I_2$	(10-134)
То же, у компенсированной машины	$w'_д=(k'_дF_2-F_1)a_д/I_2$	(10-135)

Уточненное (округленное) количество витков	$w_д$	(10-136)
Уточненная МДС катушки (А)	$F_д = w_д I_2 / a_д$	(10-137)
Уточненное отношение МДС некомпенсированной машины	$k_д = F_д / F_2$	(10-138)
То же, у компенсированной машины	$k_д = (F_д + F_1)/F_2$	(10-139)
Предварительная плотность тока в обмотке (А/мм²)	$J'_д$ — из рис. 10-26 с учетом табл. 10-4 и 10-5	
Предварительная площадь поперечного сечения проводника (мм²)	$S' = I_2/(a_д J'_д)$	(10-140)

Круглые изолированные проводники

Предварительный диаметр проводника без изоляции (мм)	$d = \sqrt{4S'/\pi}$	(10-141)
Принимаемый ближайший стандартный диаметр проводника (мм)	d — по приложению 1	
Площадь поперечного сечения принятого проводника (мм²)	S — по приложению 1	
Диаметр проводника с изоляцией (мм)	d' — по приложению 1	

Прямоугольные изолированные проводники

Принимаемые стандартные размеры проводника без изоляции (мм)	$a \times b$ — по приложению 2	
Площадь поперечного сечения принятого проводника (мм²)	S — по приложению 2	
Размеры проводника с изоляцией (мм)	$a' \times b'$ — по приложению 3	

Неизолированные проводники, гнутые на ребро

Предварительный больший размер проводника (мм)	по (10-130) ли (10-131)	
Принимаемый стандартный больший размер (мм)	b — по приложению 2	
Предварительный меньший размер проводника (мм)	$a = S'/b$	(10-142)
Принимаемый меньший размер проводника (мм)	a — по приложению 2	
Площадь поперечного сечения принятого проводника (мм²)	S — по приложению 2	
Радиус закругления проводника, мм	$r = (b_д + 2b_з + 2b_и)/2$	(10-143)
Минимальный допустимый радиус закругления проводника (мм)	r — по (10-129)	
Уточненная плотность тока в обмотке (А/мм²)	$J_д = I_2/(a_д S)$	(10-144)
Предварительная ширина многослойной катушки из изолированных проводников (мм)	$b'_{к.д}$ — по (10-132) или (10-133)	
Средняя длина витка многослойной катушки из изолированных проводников (мм)	$l_{ср.д} = 2(l_д + b_д) + \pi(b'_{к.д} + 2b_з + 2b_и)$	(10-145)
То же, однослойной катушки из неизолированных проводников, намотанных на ребро	$l_{ср.д} = 2l_д + \pi(b_д + b + 2b_з + 2b_и)$	(10-146)
Сопротивление обмотки при температуре 20°С (Ом)	$r_д = \dfrac{2\rho_д w_д l_{ср.д}}{57 a_д S \cdot 10^3}$	(10-147)

Здесь $2b_з$ — двусторонний зазор между изолированным сердечником полюса и катушкой, мм; $2b_и$ — двусторонняя толщина изоляции сердечника и катушки и крепления катушки; $2b_з+2b_и=5$ мм для машин с высотой оси вращения $h=80 \div 200$ мм, равна 6 мм при $h=225 \div 315$ и равна 7 мм при $h=355 \div 500$ мм.

Примеры расчета машин

4. Обмотка добавочных полюсов

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
135	F_2, А	(10-76)	$261 \cdot 29{,}8/(4 \cdot 2)=972$	$99 \cdot 372{,}9/(4 \cdot 2)=4614$
136	$w'_д$	(10-134)	$1{,}25 \cdot 972 \cdot 1/29{,}8=40{,}77$	$1{,}25 \cdot 4614 \cdot 1/372{,}9=$ $=15{,}47$
137	$w_д$	(10-136)	41	15
138	$F_д$, А	(10-137)	$41 \cdot 29{,}8/1=1222$	$15 \cdot 372{,}9/1=5594$
139	$k_д$	(10-138)	$1222/972=1{,}26$	$5594/4614=1{,}21$
140	$J'_д$, А/мм²	рис. 10-26	3,3	$0{,}88 \cdot 3{,}8=3{,}34$
141	S, мм²	(10-140)	$39{,}8/(1 \cdot 3{,}3)=9{,}03$	$372{,}9/(1 \cdot 3{,}34)=111{,}6$
Принимаем в соответствии с табл. 10-14 провод ПЭТП-155 (для двигателя № 1) и неизолированный провод (для двигателя № 2)				
142	$a \times b$, мм	приложение 2	$2{,}36 \times 4$	—
143	S, мм²	То же	8,89	—
144	$a' \times b'$, мм	приложение 3	$2{,}51 \times 4{,}15$	—
145	b, мм	(10-130)	—	$0{,}09 \cdot 290=26{,}1$
146	b, мм	приложение 2	—	26,3
147	a, мм	(10-142)	—	$111{,}6/26{,}3=4{,}24$
148	a, мм	приложение 2	—	4,1
149	S, мм²	То же	—	106,97
150	r, мм	(10-143)	—	$(35+6)/2=20{,}5$
151	r', мм	(10-129)		$0{,}05 \cdot 26{,}3^2/4{,}1=8{,}43$
152	$J_д$, А/мм²	(10-144)	$29{,}8/(1 \cdot 8{,}89)=3{,}35$	$372{,}9/(1 \cdot 106{,}97)=3{,}49$
153	$b'_{к.д}$, мм	(10-133)	$0{,}12 \cdot 160=19{,}2$	—
154	$l_{ср.д}$, мм	(10-145)	$2(145+19)+\pi(19{,}2+$ $+5)=404$	—
155	$l_{ср.д}$, мм	(10-146)	—	$2 \cdot 300+\pi(35+26{,}3+6)=$ $=811$
156	$r_д$, Ом	(10-147)	$\frac{4 \cdot 41 \cdot 404}{57 \cdot 1^2 \cdot 8{,}89 \cdot 10^3}=$ $=0{,}13$	$\frac{4 \cdot 15 \cdot 811}{57 \cdot 1^2 \cdot 106{,}97 \cdot 10^3}=$ $=0{,}008$
157	$r_д/r_2$	§ 10-6	$0{,}13/0{,}24=0{,}54$	$0{,}008/0{,}014=0{,}57$

§ 10-7. Стабилизирующая последовательная обмотка главных полюсов двигателей

Стабилизирующую последовательную обмотку применяют главным образом для обеспечения устойчивости скоростной характеристики двигателей; если устойчивость работы двигателей обеспе-

чивается схемой управления, то стабилизирующую последовательную обмотку не применяют.

Форму, марку и размеры проводников обмотки с целью сокращения сортамента применяемых материалов обычно унифицируют с проводниками обмотки добавочных полюсов. В отличие от обмотки добавочных полюсов катушки стабилизирующей обмотки из изолированных проводников могут выполняться не только многослойными, но и однослойными. Радиус закругления катушек из неизолированной меди, гнутой на ребро, должен удовлетворять условию (10-129). МДС стабилизирующей обмотки на полюс (А)

$$F_{пос}=(0,1\div0,2)F_2. \quad (10\text{-}148)$$

Катушки обмотки соединяют, как правило, последовательно ($a_{пос}=1$); в отдельных случаях — в две параллельные ветви ($a_{пос}=2$), в частности для выдерживания необходимого значения $F_{пос}$ при малом количестве витков в катушке.

Для определения средней длины витка многослойной катушки из изолированных проводов принимают предварительную ширину катушки (мм): при $2p=2$

$$b'_{к.пос}\approx 0,3D_{н2}; \quad (10\text{-}149)$$

при $2p=4$

$$b'_{к.пос}\approx 0,1D_{н2}. \quad (10\text{-}150)$$

В дальнейшем, после вычерчивания эскиза расположения обмотки в междуполюсном окне, ширина может быть уточнена.

Для приближенной оценки правильности вычисленного сопротивления обмотки $r_{пос}$ следует учитывать, что $r_{пос}\approx(0,04\div0,12)r_2$.

Предварительное количество витков в катушке

$$w'_{пос}=F_{пос}a_{пос}/I_2. \quad (10\text{-}151)$$

Полученное значение округляют до ближайшего целого числа $w_{пос}$. При унификации размеров проводников стабилизирующей обмотки и обмотки добавочных полюсов плотность тока $J_{пос}=J_д$. Дальнейший расчет обмотки ведут в такой последовательности.

Уточненное (округленное) количество витков	$w_{пос}$	(10-152)
Уточненное значение МДС обмотки (А)	$F_{пос}=w_{пос}I_2/a_{пос}$	(10-153)
Средняя длина витка многослойной катушки из изолированных проводов (мм)	$l_{ср.пос}=2(l_п+b_п)+\pi(b'_{к.пос}+2b_з+2b_и)$	(10-154)
Минимальный допустимый радиус закругления неизолированных проводников (мм)	r' — по (10-129)	
Принимаемый радиус закругления (мм)	$r\geqslant r'$	(10-155)
Средняя длина витка катушки из неизолированных проводников, гнутых на ребро (мм)	$l_{ср.пос}=2(l_п+b_п)+\pi(b+2r)$	(10-156)
Сопротивление обмотки при температуре 20°С (Ом)	$r_{пос}=\dfrac{2pw_{пос}l_{ср.пос}}{57a^2_{пос}S\cdot10^3}$	(10-157)

Здесь значение суммы $2(b_з+2b_и)$ такое же, как для катушек добавочных полюсов; при $r<r^1$ в (10-156) подставляют r'.

5. Стабилизирующая последовательная обмотка главных полюсов

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
			Принимаем размеры и марку провода такими же, как и у обмотки добавочных полюсов	
158	$F_{пос}$, А	(10-148)	$0{,}15\cdot972=146$	$0{,}15\cdot4614=692$
159	$w'_{пос}$	(10-151)	$146\cdot1/29{,}8=4{,}9$	$692\cdot1/372{,}9=1{,}86$
160	$w_{пос}$	(10-152)	5	2
161	$F_{пос}$, А	(10-153)	$5\cdot29{,}8=149$	$2\cdot372{,}9=746$
162	$b'_{к.пос}$, мм	(10-150)	$0{,}1\cdot160=16$	—
163	$l_{ср.пос}$, мм	(10-154)	$2\,(155+40)+\pi\,(16+5)=$ $=456$	—
164	r', мм	(10-129)	—	$0{,}05\cdot26{,}3^2/4{,}1=8{,}44$
165	r, мм	(10-155)	—	10
166	$l_{ср.пос}$, мм	(10-156)	—	$2\,(300+80)+\pi\,(26{,}3+$ $+2\cdot10)=905$
167	$r_{пос}$, Ом	(10-157)	$\frac{4\cdot5\cdot456}{57\cdot1^2\cdot8{,}89\cdot10^3}=$ $=0{,}018$	$\frac{4\cdot2\cdot905}{57\cdot1^2\cdot106{,}97\cdot10^3}=$ $=0{,}00119$
168	$r_{пос}/r_2$	§ 10-7	$0{,}018/0{,}24=0{,}075$	$0{,}00119/0{,}014=0{,}085$

§ 10-8. Характеристика намагничивания машины

Основные положения. Учитывая, что магнитная цепь машины постоянного тока симметрична, то достаточно рассчитать МДС, приходящуюся на один полюс.

Магнитная цепь машины состоит из семи однородных участков, соединенных последовательно: воздушный зазор между якорем и наконечником главного полюса, зубцы якоря, спинка якоря, зубцы наконечника главного полюса (только у компенсированных машин), сердечник главного полюса, зазор в стыке главного полюса и станины (возникающий из-за неплотности прилегания их поверхностей), станина. При расчете МДС для каждого участка принимают, что магнитная индукция на участке распределена равномерно. Для каждого участка определяют площадь поперечного сечения, магнитную индукцию, напряженность поля, среднюю длину пути магнитного потока, МДС участка, суммарную МДС, приходящуюся на всю магнитную цепь (на один полюс).

Уточнение значения магнитного потока при номинальном режиме работы производится с учетом рассчитанных сопротивлений обмоток якорной цепи и приведенных к расчетной рабочей температуре 75 или 115 °С.

Основное сопротивление магнитной цепи машины сосредоточено в воздушном зазоре между якорем и наконечником главного полюса. Сопротивление воздушного зазора увеличивается дополнительно из-за зубчатого строения якоря и наконечника глав-

ного полюса (только у компенсированных машин), бандажных канавок сердечника якоря. Это увеличение учитывается соответствующими поправочными коэффициентами; все они больше единицы. При наличии радиальных вентиляционных каналов в сердечнике якоря часть магнитного потока проходит через каналы, снижая магнитное сопротивление воздушного зазора; это уменьшение учитывается коэффициентом, который меньше единицы.

При магнитной индукции в зубцах якоря $B_{з2} \leqslant 1{,}8$ Тл принимают, что магнитный поток проходит только через зубцы, а напряженность магнитного поля $H_{з2}$ определяют соответственно по основной характеристике намагничивания (см. приложения 5, 6, 7). При $B_{з2} > 1{,}8$ Тл часть магнитного потока, проходящего через пазы, снижает действительную магнитную индукцию в зубцах. Это снижение учитывается коэффициентом $k_з$, зависящим от соотношения площадей рассматриваемых поперечных сечений зубца и паза, а для определения $H_{з2}$ пользуются кривыми (см. приложения 17, 18, 19) для разных значений $k_з$*.

У зубцов трапецеидального поперечного сечения (прямоугольные открытые пазы) кривая распределения напряженности поля H по высоте зубца близка к параболе. При расчете МДС для участка зубцов определяют напряженность поля в трех расчетных сечениях зубца — минимальном, среднем и максимальном; средние значения H при этом рассчитывают по формуле Симпсона (10-193). Если $B_{з2\,max} \leqslant 1{,}8$ Тл, то практически с достаточной точностью определяют H только по одному сечению зубца, расположенному на расстоянии $^1/_3$ его высоты; ошибка при этом незначительна. У зубцов равновеликого поперечного сечения (овальные полузакрытые пазы) при $B_{з2} > 1{,}8$ Тл напряженность поля также определяют по сечению на $^1/_3$ высоты зубца. Магнитную цепь рассчитывают в следующей последовательности.

Уточнение магнитного потока

Сопротивление обмоток якорной цепи двигателя, приведенное к стандартной рабочей температуре (Ом)	$m_т r_{2\Sigma} = m_т(r_2 + r_1 + r_д + r_{кос})$	(10-158)
Уточненная ЭДС при номинальном режиме работы двигателя (В)	$E_2 = U - I_2 m_т r_{2\Sigma} - \Delta U_щ$	(10-159)
Сопротивление обмоток якорной цепи генератора, приведенное к стандартной рабочей температуре (Ом)	$m_т r_{2\Sigma} = m_т(r_2 + r_1 + r_д)$	(10-160)
Уточненная ЭДС при номинальном режиме работы генератора (В)	$E_2 = U + I_2 m_т r_{2\Sigma} + \Delta U_щ$	(10-161)
Уточненный магнитный поток (Вб)	$\Phi = \dfrac{30E_2}{(p/a)nw_2}$	(10-162)

Здесь $\Delta V_щ = 2$ В; (10-160) соответствует генератору с параллельным или независимым возбуждением.

* При наличии в сердечнике якоря радиальных вентиляционных каналов значения коэффициента $k_з$, определяемые по приведенным ниже формулам, следует умножить на отношение $l_2/(l_2 - n_{к2} l_{к2})$.

МДС для воздушного зазора между якорем и главным полюсом

Площадь поперечного сечения в воздушном зазоре (мм^2)	$S_\delta = b'_{н.п} l'_2$	(10-163)
Уточненная магнитная индукция в воздушном зазоре (Тл)	$B_\delta = \Phi \cdot 10^6 / S_\delta$	(10-164)
Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения наконечника главного полюса	$k_{\delta_1} = 1 + \dfrac{b_{ш1}}{t_1 - b_{ш1} + 5\delta t_1 / b_{ш1}}$	(10-165)
То же, зубчатого строения якоря	$k_{\delta_2} = 1 + \dfrac{b_{ш2}}{t_2 - b_{ш2} + 5\delta t_2 / b_{ш2}}$	(10-166)
То же, бандажных канавок сердечника якоря	$k_б = 1 + \dfrac{n_б l_б (h_б - 0{,}8d)}{l_2(\delta + h_б - 0{,}8d) - n_б l_б (h_б - 0{,}8d)}$	(10-167)
Коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного сопротивления воздушного зазора при наличии радиальных каналов в сердечнике якоря	$k_к = 1 - \dfrac{3\delta}{l_{п2} + 3\delta(1 + l_{п2}/l_{к2})}$	(10-168)
Общий коэффициент воздушного зазора	$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta_2} k_б k_к$	(10-169)
МДС для воздушного зазора (А)	$F_\delta = 0{,}8\delta k_\delta B_\delta \cdot 10^3$	(10-170)

Здесь при открытых пазах вместо $b_{ш1}$ и $b_{ш2}$ подставляют в (10-165) и (10-166) ширину пазов $b_{п1}$ и $b_{п2}$ соответственно; $n_б$ — количество бандажных канавок; $l_б$ и $h_б$ — длина и высота бандажной канавки; d — диаметр магнитной бандажной проволоки; при стеклобандажах или при немагнитной бандажной проволоке в (10-167) $d=0$; предварительно, до проведения механического расчета бандажей, принимают $n_б l_б = 0{,}3 l_2$, а $d = 0{,}5 h_б$.

МДС для зубцов при овальных полузакрытых пазах якоря

Площадь равновеликого поперечного сечения зубцов (мм^2)	$S_{з2} = \dfrac{Z_2}{2p} \alpha' b_{з2} l_{эф2}$	(10-171)
Уточненная магнитная индукция в зубцах (Тл)	$B_{з2} = \Phi \cdot 10^6 / S_{з2}$	(10-172)
$B_{з2} \leq 1{,}8$ Тл		
Напряженность магнитного поля (А/см)	$H_{з2}$ — из приложения 5	
$B_{з2} > 1{,}8$ Тл		
Зубцовое деление на $^1/_3$ высоты зубца (мм)	$t_{2\,(1/3)} = \pi \left(D_{н2} - \dfrac{4}{3} h_{п2}\right) \Big/ Z_2$	(10-173)
Коэффициент зубцов	$k_{з2(1/3)} = [t_{2(1/3)} / b_{з2} k_с] - 1$	(10-174)
Напряженность магнитного поля (А/см)	$H_{з2} = f(B_{з2}$ и $k_{з2})$ — из приложения 17	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$l_{з2} = h_{п2} - 0{,}2 r_2$	(10-175)
МДС для зубцов (А)	$F_{з2} = 0{,}1 H_{з2} l_{з2}$	(10-176)

МДС для зубцов при прямоугольных открытых пазах якоря

Ширина зубца в наиболее узкой части (мм)	$b_{з2min} = \pi (D_{н2} - 2h_{п2}) / Z_2 - b_{п2}$	(10-177)

Площадь поперечного сечения зубцов в наиболее узкой части (мм²)	$S_{з2\,min}=\frac{Z_2}{2p}\alpha' b_{з2\,min} l_{эф2}$	(10-178)
Уточненная магнитная индукция в зубцах в наиболее узкой части (Тл)	$B_{з2max}=Ф\cdot 10^6/S_{з2min}$	(10-179)
$B_{з2max}\leqslant 1{,}8$ Тл		
Зубцовое деление на ⅓ высоты зубца (мм)	$t_{2(1/3)}$ — по (10-173)	
Ширина зубца (мм)	$b_{з2(1/3)}=t_{2(1/3)}-b_{п2}$	(10-180)
Площадь поперечного сечения зубцов (мм²)	$S_{з2\,(1/3)}=\frac{Z_2}{2p}\alpha' b_{з2\,(1/3)} l_{эф2}$	(10-181)
Магнитная индукция в зубцах (Тл)	$B_{з2(1/3)}=Ф\cdot 10^6/S_{з2(1/3)}$	(10-182)
Напряженность магнитного поля в зубцах (А/см)	$H_{з2}$ — из приложений 6 и 7	
$B_{з2max}>1{,}8$ Тл		
Ширина зубца в наиболее широкой части (мм)	$b_{з2max}=t_2-b_{п2}$	(10-183)
То же, в средней части	$b_{з2ср}=(b_{з2min}+b_{з2max})/2$	(10-184)
Площадь поперечного сечения зубцов в наиболее широкой части (мм²)	$S_{з2max}=S_{з2min}b_{з2max}/b_{з2min}$	(10-185)
То же, в средней части	$S_{з2ср}=(S_{з2min}+S_{з2max})/2$	(10-186)
Магнитная индукция в зубцах в наиболее широкой части (Тл)	$B_{з2min}=Ф\cdot 10^6/S_{з2max}$	(10-187)
То же, в средней части	$B_{з2ср}=Ф\cdot 10^6/S_{з2ср}$	(10-188)
Коэффициент зубцов в наиболее узкой части	$k_{з2\,max}=\frac{\pi(D_{н2}-2h_{п2})}{Z_2 b_{з2min} k_c}-1$	(10-190)
То же, в наиболее широкой части	$k_{з2min}=[t_2/(b_{з2max}k_c)]-1$	(10-191)
То же, в средней части	$k_{з2ср}=\frac{\pi(D_{н2}-h_{п2})}{Z_2 b_{з2ср} k_c}-1$	(10-192)
Напряженность магнитного поля в зубцах в наиболее узкой части (А/см)	$H_{з2max}$ — из приложений 18, 19	
То же, в наиболее широкой части	$H_{з2min}$ — из приложений 6 и 7 или 18, 19	
То же, в средней части	$H_{з2ср}$ — из приложений 6 и 7 или 18, 19	
Среднее значение напряженности магнитного поля в зубцах (А/см)	$H_{з2}=(H_{з2max}+4H_{з2ср}+H_{з2min})/6$	(10-193)
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$l_{з2}=h_{п2}$	(10-194)
МДС для зубцов (А)	$F_{з2}$ — по (10-176)	

МДС для спинки якоря

Площадь поперечного сечения спинки якоря без аксиальных каналов (мм²)	$S_{c2}=h_{c2}l_{эф2}$	(10-195)
Расчетная площадь поперечного сечения спинки якоря с аксиальными каналами (мм²)	$S_{c2}=(h_{c2}-2/3d_{к2})l_{эф2}$	(10-196)
Уточненная магнитная индукция в спинке якоря (Тл)	$B_{c2}=Ф\cdot 10^6/2S_{c2}$	(10-197)
Напряженность магнитного поля (А/см)	H_{c2} — из приложений 5, 6 и 7	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$l_{c2}=\frac{\pi(D_2+h_{c2})}{4p}+\frac{h_{c2}}{2}$	(10-198)

МДС для спинки якоря (А)	$F_{c2}=0{,}1H_{c2}l_{c2}$	(10-199)

МДС для зубцов наконечника главного полюса компенсированной машины

Длина дуги полюсного наконечника на $^1/_3$ высоты паза (мм)	$b_{н.п\,(1/3)}=b_{н.п}\left[1+\frac{(2/3)h_{п1}}{D_{н2}+2\delta}\right]$	(10-200)
Площадь поперечного сечения зубцов на $^1/_3$ высоты паза (мм²)	$S_{з1(1/3)}=l_{эф.п}(b_{н.п(1/3)}-Z_1b_{п1})$	(10-201)
Уточненная магнитная индукция (Тл)	$B_{з1(1/3)}=\sigma_{н.п}\Phi\cdot 10^6/S_{з1(1/3)}$	(10-202)
Напряженность магнитного поля (А/см)	$H_{з1}$ — из приложения 20	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$l_{з1}=h_{п1}$	(10-203)
МДС для зубцов (А)	$F_{з1}=0{,}1H_{з1}l_{з1}$	(10-204)

МДС для сердечника главного полюса

Площадь поперечного сечения сердечника полюса (мм²)	$S_п=b_пl_{эф.п}$	(10-205)
Уточненная магнитная индукция в сердечнике полюса (Тл)	$B_п=\sigma\Phi\cdot 10^6/S_п$	(10-206)
Напряженность магнитного поля (А/см)	$H_п$ — из приложения 20	
Средняя длина пути магнитного потока у некомпенсированной машины (мм)	$l_{с.п}=h_п$	(10-207)
То же, у компенсированной машины (мм)	$l_{с.п}=h_п-h_{п1}$	(10-208)
МДС для сердечника полюса (А)	$F_{с.п}=0{,}1H_пl_{с.п}$	(10-209)

Если уточненное в (10-206) значение $B_п$ превышает $B'_п$ более чем на 10 %, то следует увеличить $b_п$, а если снижено более чем на 10 %, то соответственно уменьшить $b_п$.

МДС для зазора в стыке между главным полюсом и станиной

Эквивалентный зазор в стыке между главным полюсом и станиной (мм)	$\delta_{п1}=2l_п10^{-4}+0{,}1$	(10-210)
МДС для зазора (А)	$F_{п1}=0{,}8\delta_{п1}B_п10^3$	(10-211)

МДС для станины

Площадь поперечного сечения станины из монолитного материала (мм²)	$S_{с1}=h_{с1}l_1$	(10-212)
То же, шихтованной станины	$S_{с1}=h_{с1}k_сl_1$	(10-213)
Уточненная магнитная индукция в станине (Тл)	$B_{с1}=\sigma\Phi\cdot 10^6/2S_{с1}$	(10-214)
Напряженность магнитного поля (А/см)	$H_{с1}$ — из приложений 21 или 6	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$l_{с1}=\frac{\pi(D_1+h_{с1})}{4p}+\frac{h_{с1}}{2}$	(10-215)
МДС для станины (А)	$F_{с1}=0{,}1H_{с1}l_{с1}$	(10-216)

Если уточненное значение $B_{с1}$ в (10-214) выше $B'_{с1}$ более чем на 10%, то следует увеличить $h_{с1}$ с соответствующим уменьшением $h_п$, либо увеличить l_1. При $B_{с1}$ ниже $B'_{с1}$ более чем на 10%, поступают в обратном порядке.

Суммарная магнитодвижущая сила магнитной цепи (А)

$$F_\Sigma=F_\delta+F_{з2}+F_{с2}+F_{з1}+F_{с.п}+F_{п1}+F_{с1}. \quad (10\text{-}217)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_{нас}=F_\Sigma/(F_\delta+F_{п1}). \qquad (10\text{-}218)$$

Для построения характеристики намагничивания машины по приведенной методике определяют F_Σ для значений магнитного потока 50, 75, 90, 110 и 115% Ф, соответствующего номинальному режиму работы.

Расчет характеристики намагничивания следует излагать по форме табл. 10-15 или 10-16. Для приближенной оценки правильности расчета характеристики ее можно сравнить с типовыми характеристиками намагничивания, построенными на рис. 10-27 для $K_{нас}=1,2$; 1,4; 1,6; 1,8. За 100% на этих характеристиках приняты Ф и F_Σ, соответствующие номинальному режиму работы.

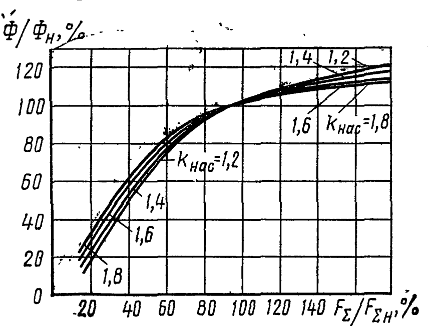


Рис. 10-27. Типовые характеристики намагничивания машин $Ф/Ф_н=f(F_\Sigma/F_{\Sigma н})$ при разных коэффициентах насыщения

Примеры расчета характеристик намагничивания см. на стр. 276—277.

Аналогично рассчитывается МДС для значений магнитного потока 0,5; 0,75; 0,9; 1,1; 1,15 Ф, соответствующего номинальному режиму работы. Результаты расчета характеристики намагничи-

Наименование участка	Средняя длина пути магнитного потока, мм	Площадь поперечного сечения участка, мм²	Коэффициенты	Поток Ф %: 50 (3,87) B	H	F	75 (5,80) B	H	F
Зазор между якорем и главным полюсом	1,6	12 074	$k_\delta=1,04$	0,32	—	426	0,48	—	639
Зубцы якоря	24,4	4 499	$k_{з2(1/3)}=1,12$	0,87	0,95	2	1,3	2,0	5
Спинка якоря	46	4 416	—	0,44	0,59	3	0,66	0,74	3
Сердечник главного полюса	53,8	6 076	$\sigma=1,2$	0,76	1,0	5	1,15	2,4	13
Зазор между главным полюсом и станиной	0,13	—	—	0,76	—	79	1,15	—	119
Станина	123	3 995	$\sigma=1,2$	0,58	4,7	58	0,87	7,66	94
F_Σ, А						573			875

Примечание. Магнитная индукция B в Тл; напряженность магнитного поля H в А/см; вычисленного в соответствии с (10-173) и (10-174).

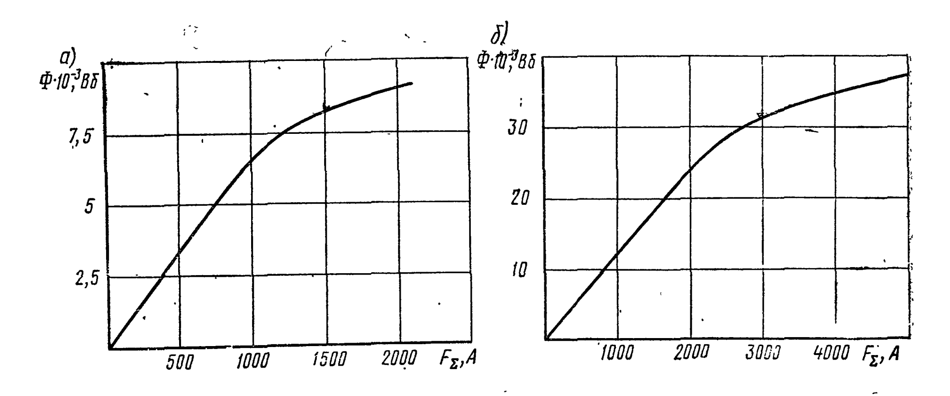


Рис. 10-28. Характеристики намагничивания двигателя № 1 (*а*) и двигателя № 2 (*б*)

вания $\Phi = f(F_\Sigma)$ приведены в табл. 10-15 (для двигателя № 1), в табл. 10-16 (для двигателя № 2), а график с характеристикой намагничивания — на рис. 10-28,*а* (для двигателя № 1), на рис. 10-28,*б* (для двигателя № 2).

Таблица 10-15

(Вб·10⁻³)

90(6,97)			100(7,74)			110(8,51)			115(8,90)		
B	*H*	*F*	*B*	*H*	*F*	*B*	*H*	*F*	*B*	*H*	*F*
0,58	—	767	0,64	—	852	0,70	—	937	0,74	—	980
1,56	12,4	30	1,74	47	115	1,91	120	293	2,0	180	439
0,79	0,87	4	0,88	0,96	4	0,96	1,05	5	1,01	1,1	6
1,38	4,7	25	1,53	7,9	43	1,68	18	97	1,76	28	151
1,38	—	143	1,53	—	159	1,68	—	175	1,76	—	183
1,04	9,9	122	1,16	12,1	149	1,28	15,2	187	1,33		212
		1091			1322			1694		—	1971

МДС *F* в А. Значения *H* при $B_{з2}>1,8$ Тл определены по приложению 16 с учетом $k_{з2(1/3)}=1,12$.

Наименование участка	Средняя длина пути магнитного потока, мм	Площадь поперечного сечения участка, мм²	Коэффициенты	Поток Φ %					
				50(15,61)			75(23,42)		
				B	H	F	B	H	F
Зазор между якорем и главным полюсом	2,7	44 610	$k_\delta=1,41$	0,35	—	1066	0,525	—	1599
Зубцы якоря	34	14 770	$k_{з2max}=$ $=1,3$	1,06	2,76	5	1,59	31	8
		19 737	$k_{з2ср}=$ $=1,0$	0,79	1,35		1,19	3,9	
		24 704	$k_{з2min}=$ $=0,8$	0,63	0,89		0,94	2,1	
Спинка якоря	94	15 390	—	0,51	0,77	7	0,76	1,22	11
Наконечник главного полюса	—	—	$\sigma_{н.п}$	—	—	—	—	—	—
Сердечник главного полюса	87,6	23 520	$\sigma=1,2$	0,8	1,0	9	1,19	2,7	24
Зазор между главным полюсом и станиной	0,16	—	—	0,8	—	102	1,19	—	153
Станина	217	15 300	$\sigma=1,2$	0,61	4,97	108	0,91	8,1	176
F_Σ, А						1297			1971

Примечание. Средние значения напряженности магнитного поля H при $B_{з2max}>1,8$ Тл

§ 10-9. Параллельная и независимая обмотка главных полюсов

МДС обмотки параллельного (или независимого) возбуждения главных полюсов $F_п$ должна обеспечить создание в воздушном зазоре магнитного потока Φ, вычисленного по (10-162). Для этого должно быть $F_п>F_\Sigma$ на значение $F_{р2}$. При наличии стабилизирующей последовательной обмотки двигателя значение $F_п$ уменьшают на МДС $F_{пос}$. МДС (А) обмотки параллельного (или независимого) возбуждения двигателя и генератора соответственно

$$F_п=F_\Sigma+F_{р2}-F_{пос}; \quad (10\text{-}219)$$

$$F_п=F_\Sigma+F_{р2}. \quad (10\text{-}220)$$

Определение размагничивающего действия поперечной МДС якоря с помощью переходных характеристик довольно трудоемкое. Целесообразнее использование для этого кривых (рис. 10-29), построенных по результатам испытания большого количества машин; указанные кривые учитывают как размагничивающее действие МДС якоря, так и МДС короткозамкнутых секций, создаваемой коммутационными токами. Из рис. 10-29 может быть опре-

(Вб·10⁻³) 90 (28,11)			100 (31,23)			110 (34, 35)			115 (35, 91)		
B	*H*	*F*	*B*	*H*	*F*	*B*	*H*	*F*	*B*	*H*	*F*
0,63	—	1919	0,7	—	2132	0,77	—	2345	0,805	—	2452
1,9	170		2,11	500		2,32	1040		2,43	1350	
1,42	11,2	124	1,58	29	352	1,74	100	821	1,82	140	1090
1,14	3,4		1,26	4,7		1,39	9,4		1,45	13	
0,91	1,95	18	1,01	2,46	23	1,11	3,1	29	1,16	3,6	34
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,43	5,6	49	1,59	9,7	85	1,75	25	219	1,83	50	438
1,43	—	184	1,59	—	204	1,75	—	224	1,83	—	235
1,1	10,9	237	1,22	13,4	291	1,34	17,6	382	1,4	20,9	454
		2531			3087			4020			4703

определены по формуле Симпсона (10-192).

делен коэффициент $k_{р2}=f(F_2/F_\Sigma)$ при различных значениях магнитной индукции в зубцах. Здесь F_Σ—результирующая МДС; F_2—из (10-76). При прямоугольных открытых пазах указанным на рис. 10-29 значениям $B_{з2}$ соответствует максимальная магнитная индукции $B_{з2\,max}$. Размагничивающее действие (А)

$$F_{р2}=k_{р2}F_2. \qquad (10\text{-}221)$$

У машин с компенсационной обмоткой $F_{р2}\approx 0$.

В двигателях с регулированием частоты вращения ослаблением поля главных полюсов и в генераторах, учитывая возможность отклонения в производстве параметров машин от расчетных значений, МДС $F_п$ обмотки увеличивают в среднем на 15% ($k_{зап}=1{,}15$) для обеспечения номинальной частоты вращения двигателей или номинального напряжения генераторов.

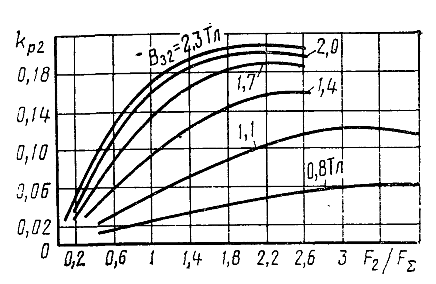


Рис. 10-29. Зависимость $k_{р2}=f(F_2/F_\Sigma)$

6. Характеристика намагничивания машин

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
169	$m_T r_{2\Sigma}$, Ом	(10-158)	1,38 (0,24+0,13+ +0,018) = 0,535	1,38 (0,014+0,008+ +0,00119) = 0,032
170	E_2, В	(10-159)	220—29,8·0,535—2= =202,1	220—372,9·0,032—2= =206,1
171	Ф, Вб	(10-162)	$\frac{30\cdot 202,1}{2/1\cdot 1500\cdot 261} = 7,74\times$ $\times 10^{-3}$	$\frac{30\cdot 206,1}{2/1\cdot 1000\cdot 99} = 31,23\times$ $\times 10^{-3}$
172	S_δ, мм²	(10-163)	77,9·155=12 074	148,7·300=44 610
173	B_δ, Тл	(10-164)	$\frac{7,74\cdot 10^{-3}}{12\,074}\cdot 10^6 = 0,64$	$\frac{31,23\cdot 10^{-3}}{44\,610}\cdot 10^3 = 0,7$
174	$k_{\delta 2}$	(10-166)	$1+\frac{2,8}{17,32-2,8+5\times}=$ $\times 1,6\cdot 17,32/2,8$ =1,04	$1+\frac{11,5}{27,59-11,5+5\times}=$ $\times 2,7\cdot 25\cdot 27,59/11,5$ =1,24
175	$k^*_б$	(10-167)	—	$1+\frac{0,3\cdot 300\,(3-0,8\cdot 1,5)}{300\,(2,7+3-0,8\times}=$ $\times 1,5)-0,3\cdot 300\,(3-$ $-0,8\cdot 1,5)$ =1,14
176	k_δ	(10-169)	1,04	1,24·1,14=1,41
177	F_δ, А	(10-170)	0,8·1,6·1,04·0,64·10³= =852	0,8·2,7·1,41·0,7·10³= =2132
178	$S_{з2}$, мм²	(10-171)	(29/4) 0,62·6,73·147,2= =4453	—
179	$B_{з2}$, Тл	(10-172)	$\frac{7,74\cdot 10^{-3}}{4453}\cdot 10^6 = 1,74$	—
180	$H_{з2}$, А/см	приложение 5	47	—
181	$l_{з2}$, мм	(10-175)	25—0,2·2,9=24,4	—
182	$F_{з2}$, А	(10-176)	0,1·47·24,4=115	—
183	$b_{з2\,min}$, мм	(10-177)	—	π (290—2·34)/33—11,5= =9,62
184	$S_{з2\,min}$, мм²	(10-178)	—	(33/4) 0,653·9,62·285= = 14 770
185	$B_{з2\,max}$, Тл	(10-179)	—	$\frac{31,23\cdot 10^{-3}}{14\,770}\cdot 10^3 = 2,11$
186	$b_{з2\,max}$, мм	(10-183)	—	27,59—11,5=16,09
187	$b_{з2ср}$, мм	(10-184)	—	(9,62+16,09)/2=12,85
188	$S_{з2\,max}$, мм²	(10-185)	—	14 770·16,09/9,62=24 704
189	$S_{з2ср}$, мм²	(10-186)	—	(14 770+24 704)/2=19 737
190	$B_{з2\,min}$, Тл	(10-187)	—	$\frac{31,23\cdot 10^{-3}}{24\,704}\cdot 10^6 = 1,26$
191	$B_{з2ср}$, Тл	(10-188)	—	$\frac{31,23\cdot 10^{-3}}{19\,737}\cdot 10^3 = 1,58$
192	$k_{з2\,max}$	(10-190)	—	$\frac{\pi\,(290-2\cdot 34)}{33\cdot 9,62\cdot 0,95} - 1 = 1,3$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
193	$k_{з2\,min}$	(10-191)	—	$\frac{27,59}{16,09\cdot 0,95}-1=0,8$
194	$k_{з2ср}$	(10-192)	—	$\frac{\pi(290-34)}{33\cdot 12,85\cdot 0,95}-1=1,0$
195	$H_{з2\,max}$, А/см	приложение 18	—	500
196	$H_{з2\,min}$, А/см	приложение 6	—	4,7
197	$H_{з2ср}$, А/см	То же	—	29
198	$H_{з2}$, А/см	(10-193)	—	$\frac{500+4\cdot 29+4,7}{6}=103$
199	$l_{з2}$, мм	(10-194)	—	34
200	$F_{з2}$, А	(10-176)	—	$0,1\cdot 103\cdot 34=352$
201	$S_{с2}$, мм²	(10-195)	$30\cdot 147,2=4416$	—
202	$S_{с2}$, мм²	(10-196)	—	$[66-(2/3)\cdot 18]\,285=$ $=15\,390$
203	$B_{с2}$, Тл	(10-197)	$\frac{7,74\cdot 10^{-3}}{2\cdot 4416}=0,88$	$\frac{31,23\cdot 10^{-3}}{2\cdot 15\,390}=1,01$
204	$H_{с2}$, А/см	приложение 5	0,96	—
205	$H_{с2}$, А/см	приложение 6		2,46
206	$l_{с2}$, мм	(10-198)	$\pi(50+30)/8+30/2=46$	$\pi(90+66)/8+66/2=94$
207	$F_{с2}$, А	(10-199)	$0,1\cdot 0,96\cdot 46=4$	$0,1\cdot 2,46\cdot 94=23$
208	$S_{п}$, мм²	(10-205)	$40\cdot 151,9=6076$	$80\cdot 294=23\,520$
209	$B_{п}$, Тл	(10-206)	$\frac{1,2\cdot 7,74\cdot 10^{-3}}{6076}\cdot 10^6=$ $=1,53$	$\frac{1,2\cdot 31,23\cdot 10^{-3}}{23\,520}\cdot 10^6=$ $=1,59$
210	$H_{п}$, А/см	приложение 20	7,9	9,7
211	$l_{с.п}$, мм	(10-207)	53,8	87,6
212	$F_{с.п}$, А	(10-209)	$0,1\cdot 7,9\cdot 53,8=43$	$0,1\cdot 9,7\cdot 87,6=85$
213	$\delta_{п1}$, мм	(10-210)	$2\cdot 155\cdot 10^{-4}+0,1=0,13$	$2\cdot 300\cdot 10^{-4}+0,1=0,16$
214	$F_{п1}$, А	(10-211)	$0,8\cdot 0,13\cdot 1,53\cdot 10^3=159$	$0,8\cdot 0,16\cdot 1,59\cdot 10^3=204$
215	$S_{с1}$, мм²	(10-212)	$17\cdot 235=3995$	$34\cdot 450=15\,300$
216	$B_{с1}$, Тл	(10-214)	$\frac{1,2\cdot 7,74\cdot 10^{-3}}{2\cdot 3995}\cdot 10^6=$ $=1,16$	$\frac{1,2\cdot 31,23\cdot 10^{-3}}{2\cdot 15\,300}\cdot 10^6=$ $=1,22$
217	$H_{с1}$, А/см	приложение 21	12,1	13,4
218	$l_{с1}$, мм	(10-215)	$\pi(274+17)/8+17/2=123$	$\pi(476+34)/8+34/2=217$
219	$F_{с1}$, А	(10-216)	$0,1\cdot 12,1\cdot 123=149$	$0,1\cdot 13,4\cdot 217=291$
220	F_{Σ}, А	(10-217)	$852+115+4+43+159+$ $+149=1322$	$2132+352+23+85+$ $+204+291=3087$
221	$K_{нас}$	(10-218)	$1322/(852+159)=1,3$	$3087/(2132+204)=1,32$

* Принимаем бандажи из магнитной проволоки.

При определении средней длины витка обмотки по (10-224) принимают предварительную ширину катушки (мм) при $2p=2$

$$b'_{к.п}=0,35D_{н2}; \qquad (10\text{-}222)$$

при $2p=4$

$$b'_{к.п}=0,12D_{н2}. \qquad (10\text{-}223)$$

В дальнейшем, после вычерчивания эскиза расположения обмоток в междуполюсном окне, ширина может быть уточнена.

Марки и размеры проводников принимают в соответствии с рекомендациями для многослойных катушек обмотки добавочных полюсов в табл. 10-14.

Предварительные значения плотности тока в обмотке $J'_п$, принимаемые при расчете обмотки, приведены на рис. 10-30 для машин с самовентиляцией, с частотой вращения 1500 об/мин и с изоляцией класса нагревостойкости F. Для изоляции класса нагревостойкости В и Н, а также для других частот умножают на поправочные вращения данные рис. 10-30 коэффициенты k_3 (из табл. 10-4) и k_6 (из табл. 10-5).

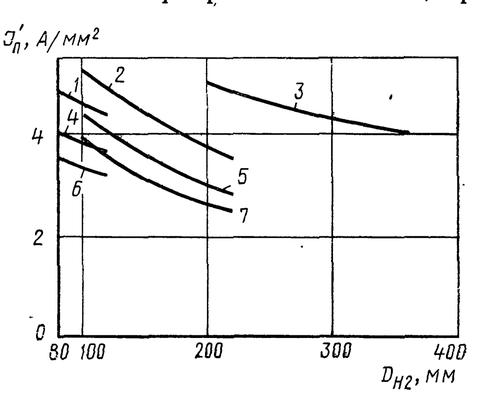


Рис. 10-30. Средние значения $J_п'=f(D_{п2})$ при классе нагревостойкости изоляции F:

1 — исполнение по защите IP22, способ охлаждения IC01, 1500 об/мин, полузакрытые пазы якоря, $2p=2$; *2* — то же, что *1*, но $2p=4$; *3* — IP22, IC01, 1500 об/мин, открытые пазы, $2p=4$; *4* — IP44, IC0141, 1500 об/мин, полузакрытые пазы, $2p=2$; *5* — то же, что *4*, но $2p=4$; *6* — IP44, IC0041, 1500 об/мин, полузакрытые пазы, $2p=2$; *7* — то же, что *6*, но $2p=4$

Для машин с независимой вентиляцией и с изоляцией класса нагревостойкости F, вне зависимости от частоты вращения, можно принять $J'_п=5,2-3,3\cdot10^{-3}\ D_{н2}$ А/мм². При изоляции классов нагревостойкости В и Н указанные значения $J'_п$ умножают на поправочный коэффициент k_3 (из табл. 10-4). Конструкция изоляции обмотки возбуждения главных полюсов приведена в приложениях 31, 32, 33.

Параметры обмотки определяют в такой последовательности.

Предварительная ширина катушки (мм)	$b'_{к.п}$ — по (10-222) или (10-223)	
Средняя длина витка обмотки (мм)	$l_{ср.п}=2(l_п+b_п)+\pi(b'_{к.п}+2b_з+2b_и)$	(10-224)
Предварительное поперечное сечение провода (мм²)	$S'=\dfrac{1,15m_{т}2pF_пl_{ср.п}}{57U_в\cdot10^3}$	(10-225)
Принятое ближайшее стандартное поперечное сечение провода (мм²)	S — из приложения 1	
Уточненный коэффициент запаса	$k_{зап}=1,15S/S'$	(10-226)
Диаметр принятого провода без изоляции (мм)	d — из приложения 1	
Диаметр принятого провода с изоляцией (мм)	d' — из приложения 1	

Предварительная плотность тока в обмотке (А/мм²)	$J'_п$ — из рис. 10-30, с учетом табл. 10-4, 10-5	
Предварительное количество витков одной катушки	$w'_п = \frac{k_{зап}F_п}{J'_п S}$	(10-227)
Уточненное (округленное) количество витков	$w_п$	(10-228)
Уточненная плотность тока в обмотке (А/мм²)	$J_п = \frac{k_{зап}F_п}{w_п S}$	(10-229)
Сопротивление обмотки при $t=20°C$ (Ом)	$r_п = \frac{2pw_п l_{ср.п}}{57S \cdot 10^3}$	(10-230)
Максимальный ток обмотки (А)	$I_{п\,max} = U_п/(m_т r_п)$	(10-231)
Максимальная МДС (А)	$F_{п\,max} = I_{п\,max} w_п$	(10-232)

Здесь значения $2b_з$ и $2b_и$ такие же, как у обмотки добавочных полюсов; в (10-225) и (10-231) подставляют коэффициент приведения сопротивления обмотки к стандартной рабочей температуре — $m_т$ (см. § 4-1).

Примеры расчета машин

7. Параллельная обмотка главных полюсов

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
222	F_2/F_Σ	§ 10-9	972/1322=0,74	4614/3087=1,49
223	$k_{р2}$	рис. 10-29	0,108	0,19
224	$F_{р2}$, А	(10-221)	0,108·972=105	0,19·4614=877
225	$F_п$, А	(10-219)	1322+105—149=1278	3087+877—746=3218
226	$b'_{к.п}$, мм	(10-223)	0,12·160=19,2	0,12·290=34,8
227	$l_{ср.п}$, мм	(10-224)	2 (155+40)+π (19,2+ +5)=466	2 (300+80)+π (34,8+ +6)=888
228	S', мм²	(10-225)	$\frac{1,15 \cdot 1,38 \cdot 4 \cdot 1278 \cdot 466}{57 \cdot 220 \cdot 10^3} = 0,3$	$\frac{1,15 \cdot 1,38 \cdot 4 \cdot 3218}{57 \cdot 220 \cdot 10^3} \cdot 888 = 1,44$
		Принимаем круглый провод марки ПЭТ-155		
229	S, мм²	приложение 1	0,302	1,431
230	$k_{зап}$	(10-226)	1,15·0,302/0,3=1,16	1,15·1,431/1,44=1,14
231	d, мм	приложение 1	0,62	1,35
232	d', мм	То же	0,675	1,435
233	$J'_п$, А/мм²	рис. 10-30	3,45	0,88·4,35=3,83
234	$w'_п$	(10-227)	1,16·1278/(3,45× ×0,302)=1418	1,14·3218/(3,83·1,431)= =669
235	$w_п$	(10-228)	1400	670
236	$J_п$, А/мм²	(10-229)	1,16·1278/(1400× ×0,302)=3,51	1,14·3218/(670·1,431)= =3,83
237	$r_п$, Ом	(10-230)	$\frac{4 \cdot 1400 \cdot 466}{57 \cdot 0,302 \cdot 10^3} = 151,6$	$\frac{4 \cdot 670 \cdot 888}{57 \cdot 1,431 \cdot 10^3} = 29,18$
238	$I_{п\,max}$, А	(10-231)	220/(1,38·151,6)=1,05	220/(1,38·29,18)=5,46
239	$F_{п\,max}$, А	(10-232)	1,05·1400=1470	5,46·670=3658

§10-10. Размещение обмоток главных и добавочных полюсов

Проверка возможности размещения обмоток главных и добавочных полюсов в междуполюсном окне состоит в расчете размеров катушек по ширине и высоте, а затем в вычерчивании (в масштабе) эскиза междуполюсного окна. При определении размеро катушек следует учитывать, что при намотке и пропитке катушки разбухают. Это разбухание учитывается соответствующими коэффициентами, принимаемыми одинаковыми по ширине и высоте катушек и равными для изолированных проводников в среднем 1,05 а по высоте катушек из неизолированных проводников, намотанных на ребро, — 1,03.

Катушки выполняют либо в виде ровных параллелепипедов, либо ступенчатой формы, которая дает возможность лучше использовать междуполюсное окно. В многослойных катушках из изолированных проводов производят раскладку витков, определяя их количество по ширине $N_ш$ и по высоте $N_в$. При проводах круглого поперечного сечения ширина и высота катушки на рассматриваемом участке (мм)

$$b_к = 1{,}05 N_ш d'; \qquad (10\text{-}233)$$

$$h_к = 1{,}05 N_в d'. \qquad (10\text{-}234)$$

При изолированных проводах прямоугольного поперечного сечения раскладку витков производят, исходя из намотки проводов большей стороной по высоте полюса. Соответственно ширина и высота катушки (мм)

$$b_к = 1{,}05 N_ш a'; \qquad (10\text{-}235)$$

$$h_к = 1{,}05 N_в b'. \qquad (10\text{-}236)$$

Высота однослойной катушки, намотанной на ребро из неизолированных проводников (мм),

$$h_к = 1{,}03[wa + (w-3)h_и] + h'_и. \qquad (10\text{-}237)$$

Здесь a — меньший размер проводника, мм; $h_и = 0{,}3$ мм — толщина изоляционной прокладки между витками; $h'_и = 2$ мм — толщина усиленной изоляции крайних витков катушки.

Размещение катушек должно быть таким, чтобы расстояние между катушками главных и добавочных полюсов ни в одном месте не было менее 6 мм у машин с высотами оси вращения $h \leqslant 200$ мм и менее 8 мм у машин с $h > 200$ мм. Между станиной и катушками при отсутствии изоляционных прокладок также должны быть предусмотрены указанные расстояния.

Если в результате прочерчивания эскиза междуполюсного окна размещение рассчитанных обмоток окажется невозможным, следует увеличить внутренний диаметр станины с соответствующим ее удлинением, чтобы площадь поперечного сечения станины сохранялась. Эскиз расположения катушек в междуполюсном окне приведен на рис. 10-31,*а* (для двигателя № 1) и на рис. 10-31,*б* (для двигателя № 2).

8. Размещение обмоток главных и добавочных полюсов

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
			Параллельная обмотка главных полюсов	
			Принимаем трапецеидальную форму поперечного сечения катушки с раскладкой витков по средней ширине $N_ш=34$, по высоте $N_в=42$	Принимаем исполнение в виде двух шайб с числом витков в каждой—335, по ширине $N_ш=28$, по высоте $N_в=12$
240	$b_к$, мм	(10-233)	$1,05 \cdot 34 \cdot 0,675 \approx 24$	$1,05 \cdot 28 \cdot 1,435 \approx 42$
241	$h_к$, мм	(10-234)	$1,05 \cdot 42 \cdot 0,675 \approx 30$	$1,05 \cdot 12 \cdot 1,435 \approx 18$
			Стабилизирующая последовательная обмотка	
242	$b_к$, мм	(10-235)	$1,05 \cdot 2,47 \cdot 5 \approx 13$	—
243	$h_к$, мм	(10-236)	$1,05 \cdot 4,15 \approx 5$	—
244	$h_к$, мм	(10-237)	—	$1,03 \cdot 2 \cdot 4+2 \approx 10$
			Обмотка добавочных полюсов	
			Принимаем форму параллелепипеда	
245	$b_к$, мм	(10-235)	$1,05 \cdot 5 \cdot 2,47 \approx 13$	—
246	$h_к$, мм	(10-236)	$1,05 \cdot 8 \cdot 4,15 \approx 35$	—
247	$h_к$, мм	(10-237)	—	$1,03\,[15 \cdot 4+(15-3)0,3]+2 \approx 68$

Рис. 10-31. Эскиз расположения катушек в междуполюсном окне двигателя № 1 (*а*) и двигателя № 2 (*б*)

§ 10-11. Щетки и коллектор

Марки щеток выбирают при проектировании машин, однако при настройке коммутации изготовленной машины марка щеток может быть изменена. Из марок щеток, предусмотренных ГОСТ 2332—75, распространены графитные щетки 611М (при $E_р \leqslant 3$ В) и электрографитированные — ЭГ4, ЭГ14, ЭГ74 (при $E_р > 3$ В). Для закрытых машин с кремнийорганической изоляцией класса нагревостойкости Н применяют электрографитированные щетки со специальной пропиткой ЭГ74К.

Размеры щеток оговорены в ГОСТ 12232.1—71. При выборе ширины щетки t следует учитывать, что увеличение t ограничивается возрастанием при этом ширины зоны коммутации $b_{з.к}$; критерием к выбору t является отношение ширины зоны коммутации к расстоянию между соседними наконечниками главных полюсов $(\tau - b_{н.п})$:

$$k_{з.к} = b_{з.к}/(\tau - b_{н.п}), \tag{10-238}$$

где ширина зоны коммутации (мм)

$$b_{з.к} = (t/t_к + N_ш - a/p + \varepsilon_к)\, t_к D_{н2}/D_к. \tag{10-239}$$

Здесь укорочение (подставляемое всегда со знаком плюс)

$$\varepsilon_к = K/2p - y_1. \tag{10-240}$$

При большом значении $k_{з.к}$ может возникнуть воздействие поля главных полюсов на коммутирующие секции, ухудшающее коммутацию. Наибольшие допустимые значения $k_{з.к} = 0{,}6 \div 0{,}75$ (бóльшие значения — для меньших диаметров якоря).

При выборе ширины щетки следует учитывать целесообразное, по условиям улучшения коммутации, число перекрытых щеткой коллекторных делений

$$\gamma = t/t_к. \tag{10-241}$$

При простой волновой обмотке якоря рекомендуемое значение $\gamma = 2 \div 4$; при простой петлевой — $\gamma \leqslant (N_ш + 0{,}5)$; при двухходовой петлевой — $\gamma > 3$.

Отношение длины щетки a к ее ширине не должно быть более двух, а длина щетки — более 40 мм. Рекомендуемые значения t и a в зависимости от диаметра якоря приведены ниже:

$D_{н2}$, мм	70—100		свыше	100—200		свыше	200—400		свыше	400
Стандартная ширина щетки t, мм	8	10	10	12,5	16	16	20	25	25	32
Стандартная длина щетки a, мм	10; 12,5	12,5; 16	12,5; 16	16; 20	25; 32	25; 32	25; 32	32	32	40

Щетки шириной 25 и 32 мм для улучшения их контакта с коллектором при толчках и вибрациях следует подразделять на две (2×12,5 или 2×16 мм).

Выбрав размеры щеток и проверив удовлетворение условиям, относящимся к (10-238) и (10-241), дальнейший расчет производят в такой последовательности.

Контактная площадь одной щетки (мм²)	$S_щ = ta$	(10-242)
Необходимая контактная площадь всех щеток (мм²)	$S'_{щΣ} = 2I_2 \cdot 10^2 / J'_щ$	(10-243)
Количество щеток на одном бракете	$N'_{щ.б} = S'_{щΣ}/(2pS_щ)$	(10-244)
Уточненное (округленное) количество щёток на одном бракете	$N_{щ.б}$	
Уточненная контактная площадь всех щеток (мм²)	$S_{щΣ} = N_{щ.б} 2pS_щ$	(10-245)
Уточненная плотность тока под щетками (А/см²)	$J_щ = 2I_2 \cdot 10^2 / S_{щΣ}$	(10-246)
Активная длина коллектора (мм)	$l_к = N_{щ.б}(a+8)+10$	(10-247)
Окружная скорость коллектора при номинальной частоте вращения (м/с)	$v_к = \pi D_к n_{ном}/60\,000$	(10-248)

С учетом возможной перегрузки машины плотность тока $J'_щ$ в (10-243) для номинального режима работы принимают равной 8 А/см²; для надежности работы узла коллектор — щетки число щеток на бракете не должно быть менее двух.

Примеры расчета машин
9. Щетки и коллектор

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
248	t, мм	§ 10-11	10	16
249	a, мм	§ 10-11	12,5	25
250	γ	(10-241)	10/4,51=2,2	16/6,34=2,5
251	$\varepsilon_к$	(10-240)	87/4—21=0,75	99/4—24=0,75
252	$b_{з.к}$, мм	(10-239)	(10/4,51+3—0,5++0,75)4,51·160 125=31,5	(16/6,34+3—0,5+0,75)××6,34·290/200=53
253	$k_{з.к}$	(10-238)	31,5/(125,6—78)=0,66	53/(227,6—149)=0,67
254	$S_щ$, мм²	(10-242)	10·12,5=125	16·25=400
255	$S'_{щΣ}$, мм²	(10-243)	2·29,8·10²/8=745	2·372,9·10²/8=9322
256	$N'_{щ.б}$	(10-244)	745/(4·125)=1,49	9322/(4·400)=5,83
257	$N_{щ.б}$	§ 10-11	2	6
258	$S_{щΣ}$, мм²	(10-245)	4·2·125=1000	4·6·400=9600
259	$J_щ$, А/см²	(10-246)	2·29,8·10²/1000=5,96	2·372,9·10²/9600=7,77
260	$l_к$, мм	(10-247)	2(12,5+8)+10=51	6(25+8)+10=208
261	$v_к$, м/с	(10-248)	π·125·1500/60 000=9,8	π·200·1000/60 000= 10,47

§ 10-12. Коммутационные параметры

Одним из важных показателей условий коммутации машин является реактивная ЭДС коммутирующих секций (В)

$$E_р = 2w_{с2} l_2 A_2 v_2 \lambda_{п2} \cdot 10^{-7}. \qquad (10\text{-}249)$$

Для двигателей с частотой вращения, регулируемой вверх от номинальной, в (10-249) подставляют окружную скорость якоря (м/с)

$$v_{2max} = \pi D_{н2} n_{max}/60\,000. \qquad (10\text{-}19а)$$

При проектировании машин следует стремиться к тому, чтобы значение $E_р$ при максимальной частоте вращения, достигаемой у двигателей ослаблением поля главных полюсов, не выходило за следующие пределы:

h, мм	80—200	225—315	225—500
Род обмотки	петлевая ($2p=2$) волновая ($2p=4$) с $w_{c2}>1$	волновая	петлевая или лягушечья
$E_р$, В	2,5—3,5	4—5	8—12

Бóльшие значения $E_р$ относятся к машинам с окружной скоростью якоря $v_2<25\div30$ м/с.

На условия коммутации машин кроме величины $E_р$ влияют также и другие факторы: отклонение в параметрах машин, вызванные производственно-технологическими причинами, например несимметричное расположение полюсов по окружности станины и щеткодержателей на траверсе; неточность расчета, появляющаяся из-за определенных допущений.

От влияния перечисленных факторов при испытании машины может возникнуть искрение, превышающее пределы, оговоренные ГОСТ 183—74 или соответствующими техническими условиями. При настройке коммутации таких машин используют изменение зазора между якорем и добавочным полюсом, марки и ширины щетки, а также, в особо неблагоприятных случаях, размеров наконечников добавочных полюсов. Для возможности изменения зазора размещают между сердечниками добавочных полюсов и станиной несколько стальных прокладок с общей их высотой, равной около 50% расчетного зазора $\delta_д$.

Обеспечение соответствия между $E_р$ и ЭДС $E_к$ при изменении нагрузки осуществляется последовательным соединением обмоток якоря и добавочных полюсов.

При проектировании машин для облегчения условий коммутации применяют: ненасыщенную магнитную цепь для потока добавочных полюсов, в первую очередь на участке сердечников добавочных полюсов, в которых магнитная индукция $B_д$ не должна быть более 1,6 Тл, а также на участках станины и спинки якоря, в которых суммируются магнитные потоки главных и добавочных полюсов; расчетная магнитная индукция на участке станины при суммировании потоков — B''_{c1} не должна быть более 1,6 Тл, а на участке спинки якоря B''_{c2} — более 1,7 Тл; ширину полюсного наконечника $b_{н.д}$ (с учетом «распушения» магнитного поля) примерно равной $b_{з.к}$ — $(1,5\div3)\delta_д$; коэффициент $k_{з.к}$ не выходящий за пределы, указанные в § 10-11.

Улучшению условий коммутации машин содействует уменьшение проводимости рассеяния паза путем допустимого снижения высоты и увеличения ширины паза якоря, а также уменьшение w_{c2} в машинах со всыпной обмоткой путем допустимого увеличения количества коллекторных пластин.

Проводимость рассеяния овального полузакрытого паза (см. рис. 10-20)

$$\lambda_{п2} = 0{,}6\frac{h_{п2}}{2r_2} + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} + \frac{l_{л2}}{l_2} + \frac{2{,}5\cdot10^6}{w_{c2}l_2A_2v_2}\,\frac{a}{p}, \qquad (10\text{-}250)$$

прямоугольного открытого паза (см. рис. 10-23)

$$\lambda_{п2} = 0{,}6\frac{h_{п2}}{b_{п2}} + \frac{l_{л2}}{l_2} + \frac{2{,}5\cdot10^5}{w_{c2}l_2A_2v_2}\,\frac{a}{p}. \qquad (10\text{-}251)$$

Приведенные формулы приближенные, так как они не учитывают влияния укорочения шага обмотки, перекрытия щеткой коллекторных делений, материала бандажей лобовых частей обмотки. Для больших машин ($h \geqslant 355$ мм), если они работают при напряженных условиях коммутации, может быть применена приведенная в [15] уточненная, но более сложная методика расчета $E_р$ и $\delta_д$, в которой находят свое отражение неучтенные факторы.

При расчете МДС воздушного зазора между якорем и добавочным полюсом следует иметь в виду, что магнитное сопротивление зазора изменяется из-за зубчатого строения сердечника якоря, наличия бандажных канавок на сердечнике якоря и радиальных каналов. Это изменение учитывается соответствующими поправочными коэффициентаи $k_{\delta д2}$, $k_{б.д}$ и $k_{к.д}$, рассчитываемыми по (10-166)—(10-168) с подстановкой в эти уравнения вместо δ предварительного значения $\delta'_д$ из рис. 10-16. Если зазор $\delta_д$, уточненный в (10-254), будет отличаться от предварительно принятого значения более чем на 5%, то повторяют расчет $k_{\delta д}$ с новым значением $\delta'_д$. Коэффициент магнитного рассеяния добавочных полюсов $\sigma_д$ может быть принят равным 2 при $2p_д=1$; 3÷3,5 при $2p_д=2p$ и отсутствии компенсационной обмотки; 2 — у машины с компенсационной обмоткой.

Дальнейший расчет коммутационных параметров производят в такой последовательности.

Среднее значение магнитной индукции в зазоре под добавочным полюсом (Тл)	$B_{\delta д} = \lambda_{п2}A_2\cdot10^{-4}$	(10-252)
Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения якоря	$k_{\delta д2}$ — по (10-166)	
То же, бандажных канавок сердечника якоря	$k_{б.д}$ — по (10-167)	
Коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного сопротивления воздушного зазора при наличии радиальных каналов в сердечнике якоря	$k_{к.д}$ — по (10-168)	
Общий коэффициент воздушного зазора	$k_{\delta д} = k_{\delta д2}k_{б.д}k_{к.д}$	(10-253)
Необходимый зазор под добавочным полюсом (мм)	$\delta_д = \dfrac{F_д + F_1 - F_2}{0{,}08B_{\delta д}k_{\delta д}}\cdot10^4$	(10-254)
Магнитный поток в зазоре под добавочным полюсом при номинальной нагрузке (Вб)	$\Phi_{\delta д} = b_{з.к}l_{н.д}B_{\delta д}\cdot10^{-6}$	(10-255)
То же, при перегрузке	$\Phi'_{\delta д} = \Phi_{\delta д}I_{max}/I_н$	(10-255а)

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса при номинальной нагрузке (Вб)	$\Phi_д = \sigma_д \Phi_{\delta д}$	(10-256)
То же, при перегрузке	$\Phi'_д = \Phi_д I_{max}/I_н$	(10-257)
Площадь поперечного сечения сердечника добавочного полюса (мм²)	$S_д = b_д l_д k_c$	(10-258)
Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса при перегрузке (Тл)	$B_д = \Phi'_д \cdot 10^6 / S_д$	(10-259)
Расчетная магнитная индукция на участках станины, в которых суммируются магнитные потоки главных и добавочных полюсов (Тл)	$B''_{c1} = \dfrac{\sigma\Phi + \Phi'_д}{2S_{c1}} \cdot 10^6$	(10-260)
Расчетная магнитная индукция на участках спинки якоря, в которых суммируются магнитные потоки главных и добавочных полюсов (Тл)	$B''_{c2} = \dfrac{\Phi + \Phi'_{\delta д}}{2S_{c2}} \cdot 10^6$	(10-261)

Примеры расчета машин

10. Коммутационные параметры

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
262	$\lambda_{п2}$	(10-250)	$0,6\frac{25}{2\cdot 2,9}+\frac{0,8}{2,8}+\frac{168}{155}+\frac{2,5\cdot 10^6}{3\cdot 155\cdot 154,8\cdot 12,56}\times\frac{1}{2}=5,34$	—
263	$\lambda_{п2}$	(10-251)	—	$0,6\frac{34}{11,5}+\frac{307}{300}+\frac{2,5\cdot 10^6}{1\cdot 300\cdot 405,4\cdot 15,18}\times\frac{1}{2}=3,47$
264	$v_{2\,max}$, м/с	(10-19а)	$\pi\cdot 160\cdot 3000/60\,000=25,1$	$\pi\cdot 290\cdot 2000/60\,000=30,4$
265	$E_р$, В	(10-249)	$2\cdot 3\cdot 155\cdot 154,8\cdot 25,1\times 5,34\cdot 10^{-7}=1,9$	$2\cdot 1\cdot 300\cdot 405,4\cdot 30,4\times 3,47\cdot 10^{-7}=2,6$
266	$B_{\delta д}$, Тл	(10-252)	$5,34\cdot 154,8\cdot 10^{-4}=0,08$	$3,47\cdot 405,4\cdot 10^{-4}=0,14$
267	$k_{\delta д2}$	(10-166)	$1+\frac{2,8}{17,32-2,8+5\times 3,3\cdot 17,32/2,8}=1,02$	$1+\frac{11,5}{27,59-11,5+5\times 5,4\cdot 27,59/11,5}=1,14$
268	$k_{б.д}$	(10-167)	—	$1+\frac{0,3\cdot 300\,(3-0,8\cdot 1,5)}{300\,(5,4+3-0,8\times 1,5)-0,3\cdot 300\times(3-0,8\cdot 1,5)}=1,08$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
269	$k_{\delta д}$	(10-253)	1,02	1,14·1,08=1,23
270	$\delta_д$, мм	(10-254)	$\frac{1222-972}{0,08\cdot 0,08\cdot 1,02}\cdot 10^{-4}=$ =3,8	$\frac{5594-4614}{0,08\cdot 0,14\cdot 1,23}\cdot 10^{-4}=$ =7,1
271	$k_{\delta д 2}$	(10-166)	$1+\frac{2,8}{17,32-2,8+5\cdot 3,8\times}=$ $\times 17,32/2,8$ =1,02	$1+\frac{11,5}{27,59-11,5+5\times}=$ $\times 7,2\cdot 27,59/11,5$ =1,12
272	$k_{б.д}$	(10-167)	—	$1+\frac{0,3\cdot 300\ (3-}{300\ (7,2+3-0,8\times}\rightarrow$ $\rightarrow\frac{-0,8\cdot 1,5)}{\times 1,5)-0,3\cdot 300\times}=$ $\times(3-0,8\cdot 1,5)$ =1,06
273	$k_{\delta д}$	(10-253)	1,02	1,12·1,06=1,19
274	$\delta_д$, мм	(10-254)	$\frac{1222-972}{0,08\cdot 0,08\cdot 1,02}\cdot 10^{-4}=$ =3,8	$\frac{5594-4614}{0,08\cdot 0,14\cdot 1,19}\cdot 10^{-4}=$ =7,3
275	$\Phi_{\delta д}$, Вб	(10-255)	$31,5\cdot 155\cdot 0,08\cdot 10^{-6}=$ $=0,39\cdot 10^{-3}$	$48\cdot 300\cdot 0,14\cdot 10^{-6}=$ $=2,2\cdot 10^{-3}$
275а	$\Phi'_{\delta д}$, Вб	(10-255а)	$1,5\cdot 0,39\cdot 10^{-3}=$ $=0,585\cdot 10^{-3}$	$1,5\cdot 2,2\cdot 10^{-3}=3,3\times$ $\times 10^{-3}$
276	$\Phi_д$, Вб	(10-256)	$3\cdot 0,39\cdot 10^{-3}=1,17\cdot 10^{-3}$	$3\cdot 2,2\cdot 10^{-3}=6,6\cdot 10^{-3}$
277	$\Phi'_д$, Вб	(10-257)	$1,5\cdot 1,17\cdot 10^{-3}=1,75\times$ $\times 10^{-3}$	$1,5\cdot 6,6\cdot 10^{-3}=9,9\times$ $\times 10^{-3}$
278	$S_д$, мм²	(10-258)	19·145·0,98=2700	35·300·0,98=10 290
279	$B_д$, Тл	(10-259)	$\frac{1,75\cdot 10^{-3}}{2700}\cdot 10^{6}=0,648$	$\frac{9,9\cdot 10^{-3}}{10290}\cdot 10^{6}=0,962$
280	B''_{c1}, Тл	(10-260)	$\frac{1,2\cdot 7,74\cdot 10^{-3}+ +1,75\cdot 10^{-3}}{2\cdot 3995}\times$ $\times 10^{6}=1,38$	$\left(\frac{1,2\cdot 31,23\cdot 10^{-3}}{2\cdot 15\,300}+\right.$ $\left.+\frac{9,9\cdot 10^{-3}}{2\cdot 15\,300}\right)10^{6}=1,55$
281	B''_{c1}, Тл	§ 10-12	1,6	1,6
282	B''_{c2}, Тл	(10-261)	$\frac{7,74\cdot 10^{-3}+0,585\times \times 10^{-3}}{2\cdot 4416}\times$ $\times 10^{6}=0,94$	$\frac{31,23\cdot 10^{-3}+3,3\times \times 10^{-3}}{2\cdot 15\,390}\times$ $\times 10^{6}=1,12$
283	B''_{c2}, Тл	§ 10-12	1,7	1,7

§ 10-13. Номинальный режим

Уточним основные параметры машин, относящиеся к номинальному режиму работы: у двигателей — КПД, ток, магнитный

поток, необходимая МДС параллельной или независимой обмотки возбуждения, а у генераторов — КПД. Уточнение значения КПД (предварительно принятого в § 10-3) начинают с расчета потерь с учетом гл. 4.

В машинах постоянного тока различают следующие основные потери: электрические в обмотке якоря, компенсационной обмотке, обмотке добавочных полюсов, в цепи возбуждения главных полюсов, в переходных контактах щеток; магнитные потери в сердечнике якоря; механические потери на трение щеток о коллектор, на трение подшипников и якоря о воздух, на вентиляцию. Кроме того, в машине возникают добавочные потери.

Электрические потери в обмотках якорной цепи определяют с учетом приведения сопротивления к стандартной рабочей температуре.

Потери в обмотке возбуждения главных полюсов генератора определяют при $F_{\text{п max}}$, т. е. при самых неблагоприятных условиях, когда используется весь запас МДС обмотки. Аналогично определение тока двигателя производят с учетом $I_{\text{п max}}$.

Магнитные потери в стали при стационарном режиме возникают только (см. § 4-1) в сердечнике (в зубцах и в спинке) якоря, который при вращении подвергается перемагничиванию. В полюсах и в станине направление и величина магнитного потока сохраняются, следовательно, магнитных потерь в них не возникает (за исключением небольших потерь в полюсных наконечниках, относимых к категории добавочных потерь).

Уравнение (10-268) для определения потерь на трение о коллектор соответствует удельному нажатию на щетку $2 \cdot 10^4$ Па и коэффициенту трения, равному 0,25.

Определение расчетным путем КПД генераторов не представляет затруднений, поскольку известна полезная мощность. При определении КПД двигателей, особенно меньших мощностей, возникает необходимость дополнительных расчетов с последовательным приближением к действительной величине КПД, так как предварительно принятый ток может не соответствовать заданной полезной мощности. В [15] получены зависимости для определения ЭДС и тока якоря без последовательного приближения [см. (10-276)—(10-278)].

При номинальном режиме работы КПД и другие технические показатели определяют в такой последовательности.

Масса стали зубцов якоря с овальными полузакрытыми пазами (кг)

$$m_{з2} = 7{,}8 Z_2 b_{з2} \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2}\right) l_{эф2} \cdot 10^{-6} \qquad (10\text{-}262)$$

То же, с прямоугольными открытыми пазами

$$m_{з2} = 7{,}8 Z_2 b_{з2ср} h_{п2} l_{эф2} \cdot 10^{-6} \qquad (10\text{-}263)$$

Магнитные потери в зубцах (Вт)

$$P_{з2} = 2{,}3 p_{1,0/50} \, (f/50)^{\beta} B^2_{з2ср} m_{з2} \qquad (10\text{-}264)$$

Масса стали спинки якоря (кг)

$$m_{c2} = 7{,}8 \left\{ \frac{\pi \left[(D_{н2} - 2h_{п2})^2 - D^2_2 \right]}{4} - 0{,}785 n_к d^2_к \right\} l_{эф2} \cdot 10^{-6} \qquad (10\text{-}265)$$

Магнитные потери в спинке якоря (ВТ)	$P_{c2}=2{,}3p_{1,0/50}\,(f/50)^{\beta}B^2{}_{c2}m_{c2}$	(10-266)
Суммарные магнитные потери в стали (Вт)	$P_{c\Sigma}=P_{з2}+P_{c2}$	(10-267)
Потери на трение щеток о коллектор (Вт)	$P_{т.щ}=5S_{щ\Sigma}v_{к}\cdot 10^{-3}$	(10-268)
Потери на трение подшипников, трение о воздух и на вентиляцию машин со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01 (Вт)	$P_{т.п}+P_{вен}=780D_{н2}^{3,6}(n/1500)^{1,8}\cdot 10^{-9}$	(10-269)
То же, для IP22 или IP44, IC17 или IC37	$P_{т.п}+P_{вен}=3{,}85D^4{}_{н2}(n/1500)^{2}\cdot 10^{-9}$	(10-270)
То же, для IP44, IC0141	$P_{т.п}+P_{вен}=2200D_{н2}^{3,6}(n/1500)^{2}\cdot 10^{-9}$	(10-271)
То же, для IP44, IC0041	$P_{т.п}+P_{вен}=280D^{3,6}{}_{н2}(n/1500)^{1,8}\cdot 10^{-9}$	(10-272)
Суммарные механические потери (Вт)	$P_{мх\Sigma}=P_{т.щ}+P_{т.п}+P_{вен}$	(10-273)

Двигатель

Добавочные потери у некомпенсированного двигателя (Вт)	$P_{д}=0{,}01P_2/\eta$	(10-274)
То же, у компенсированного двигателя	$P_{д}=0{,}005P_2/\eta$	(10-275)
Электромагнитная мощность двигателя (Вт)	$P_{эм}=P_{2н}+P_{c\Sigma}+P_{мх\Sigma}+P_{д}$	(10-276)
ЭДС якоря двигателя (В)	$E_2=\dfrac{U-\Delta U_{щ}}{2}+\sqrt{\left(\dfrac{U-\Delta U_{щ}}{2}\right)^2-P_{эм}m_{т}r_{2\Sigma}}$	(10-277)
Ток якоря двигателя (А)	$I_2=P_{эм}/E_2$	(10-278)
Уточненный ток двигателя (А)	$I=I_2+I_{п\,max}$	(10-279)
Подводимая мощность двигателя (Вт)	$P_1=UI$	(10-280)
Суммарные потери в двигателе (Вт)	$P_{\Sigma}=P_1-P_2$	(10-281)
Уточненный КПД двигателя (о. е.)	η — по (4-2)	
Магнитный поток двигателя (Вб)	Φ — по (10-162)	
МДС магнитной цепи двигателя (А)	F_{Σ} — по характеристике намагничивания машины (10-282)	
Размагничивающее действие МДС якоря двигателя (А)	$F_{р2}$ — по (10-221) и рис. 10-29	
МДС последовательной стабилизирующей обмотки двигателя (А)	$F_{пос}$ — по (10-153)	
Необходимая МДС параллельной или независимой обмотки главных полюсов двигателя (А)	$F_{п}=F_{\Sigma}+F_{р2}-F_{пос}$	(10-283)
Момент вращения на валу двигателя (Н·м)	$M_2=9{,}55P_2/n$	(10-284)

Генератор

Электрические потери в обмотках якорной цепи генератора (Вт)	$P_{м\Sigma}=I^2{}_2m_1r_{2\Sigma}$	(10-285)

То же, в обмотке возбуждения генератора	$P_{м.п}=U_п I_{п\,max}$	(10-286)
То же, в контактах щеток генератора	$P_{к.щ}=\Delta U_щ I_2$	(10-287)
Добавочные потери у некомпенсированного генератора (Вт)	$P_д=0{,}01P_2$	(10-288)
То же, у компенсированного генератора	$P_д=0{,}05P_2$	(10-289)
Подводимая мощность генератора (Вт)	$P_1=P_{2н}+P_\Sigma$	(10-290)
Уточненный КПД генератора (о. е)	η — по (4-2)	

Примеры расчета машин

11. Номинальный режим

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
284	$m_{з2}$, кг	(10-262)	$7{,}8\cdot 29\cdot 6{,}8\left(16{,}6+\frac{4{,}7+2{,}9}{2}\right)147\cdot 2\cdot 10^{-6}=4{,}6$	—
285	$m_{з2}$, кг	(10-263)	—	$7{,}8\cdot 33\cdot 12{,}85\cdot 34\cdot 285\times 10^{-6}=32{,}05$
286	$P_{з2}$, Вт	(10-264)	$2{,}3\cdot 2{,}5\,(50/50)^{1,5}\times 1{,}72^2\cdot 4{,}6=78$	$2{,}3\cdot 1{,}75\,(33{,}3/50)^{1,4}\times 1{,}58^2\cdot 32{,}05=180$
287	m_{c2}, кг	(10-265)	$7{,}8\frac{\pi[(160-2{,}25)^2-50^2]}{4}\times 147{,}2\cdot 10^{-6}=8{,}7$	$7{,}8\left\{\frac{\pi[(290-2\cdot 34)^2-90^2]}{4}-0{,}785\cdot 21\cdot 18^2\right\}285\times 10^{-6}=60$
288	P_{c2}, Вт	(10-266)	$2{,}3\cdot 2{,}5\,(50/50)^{1,5}\times 0{,}88^2\cdot 8{,}7=39$	$2{,}3\cdot 1{,}75\,(33{,}3/50)^{1,4}\times 1{,}01^2\cdot 60=139$
289	$P_{c\Sigma}$, Вт	(10-267)	$78+39=117$	$180+139=319$
290	$P_{т.щ}$, Вт	(10-268)	$5\cdot 1000\cdot 9{,}8\cdot 10^{-3}=49$	$5\cdot 9600\cdot 10{,}47\cdot 10^{-3}=503$
291	$P_{т.п}+P_{вен}$, Вт	(10-271)	$2200\cdot 160^{3,6}\,(1500/1500)^2\times 10^{-9}=189$	—
292	$P_{т.п}+P_{вен}$, Вт	(10-269)	—	$780\cdot 290^{3,6}\,(1000/1500)^{1,8}\times 10^{-9}=275$
293	$P_{мх\Sigma}$, Вт	(10-273)	$49+189=238$	$503+275=778$
294	$P_д$, Вт	(10-274)	$0{,}01\cdot 5500/0{,}82=67$	$0{,}01\cdot 75000/0{,}905=829$
295	$P_{эм}$, Вт	(10-276)	$5500+117+238+67=5922$	$75\,000+319+778+829=76\,926$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
296	E_2, В	(10-277)	$\frac{220-2}{2}+\sqrt{\left(\frac{220-2}{2}\right)^2-5922\cdot 0,535}=202,3$	$\frac{220-2}{2}+\sqrt{\left(\frac{220-2}{2}\right)^2-76\,926\cdot 0,032}=206,1$
297	I_2, А	(10-278)	5922/202,3=29,3	76 926/206,1=373,3
298	I, А	(10-279)	29,3+1,05=30,35	373,3+5,46=378,76
299	P_1, Вт	(10-280)	220·30,35=6677	220·378,76=83 327
300	P_Σ, Вт	(10-281)	6677—5500=1177	83 327—75 000=8327
301	η, о. е.	(4-2)	1—1177/6677=0,824	1—8327/83327=0,90
302	Ф, Вб	(10-162)	$\frac{30\cdot 202\cdot 3}{\frac{2}{1}\cdot 1500\cdot 261}=7,75\cdot 10^{-3}$	$\frac{30\cdot 206\cdot 1}{\frac{2}{1}\cdot 1000\cdot 99}=31,23\cdot 10^{-3}$
303	F_Σ, А	(10-282)	1330	3087
304	F_{p2}, А	(10-221)	105	877
305	$F_{пос}$, А	(10-153)	5·29,3=146	2·373,3=747
306	$F_п$, А	(10-283)	1330+105—146=1289	3087+877—747=3217
307	M_2, Н·м	(10-284)	9,55·5500/1500=35,02	9,55·75 000/1000=716,25

При отсутствии аксиальных каналов в якоре второй член в фигурных скобках (10-265) равен нулю; значения $P_{1,0/50}$ и β приведены в § 4-1.

§ 10-14. Рабочие характеристики

Уточненные в § 10-13 параметры машины при номинальном режиме работы используют для расчета соответствующих параметров при нагрузках, отличающихся от номинальной, в результате чего могут быть построены рабочие характеристики машин. К основным рабочим характеристикам двигателей относятся зависимости n, M_2, η, $I=f(P_2)$, у генераторов — U, $\eta=f(P_2)$.

Характеристики двигателей рассчитывают при номинальных напряжении на зажимах цепи якоря и токе возбуждения, а характеристики генераторов — при неизменных частоте вращения и токе возбуждения, если оно независимое, или величине регулируемого сопротивления в цепи возбуждения, если генератор с параллельным возбуждением.

Для упрощения расчета характеристик двигателей и генераторов принимают $F_{p2}\equiv k=I_2/I_{2н}$ (индексом «н» здесь и далее в

этом параграфе обозначаются параметры при номинальном режиме работы). При расчете характеристик, учитывая незначительное влияние изменения нагрузки на Ф и n, принимают $P_{c\Sigma}$ и $P_{мх\,\Sigma}$ такими же, как при номинальном режиме работы.

Рассчитывают рабочие характеристики двигателей в такой последовательности. Задаются коэффициентами нагрузки $k=0{,}1$; 0,25; 0,5; 0,75; 1,25 и вычисляют для этих нагрузок ток $I_2=kI_{2н}$. Затем для каждого значения тока определяют E_2 по (10-159), $F_{р2}=kF_{р2н}$, $F_{пос}=kF_{пос.н}$, $F_\Sigma=F_п+F_{пос}-F_{р2}$, Ф — по характеристике намагничивания машины, $n=30E_2/[(p/a)w_2\Phi]$; I по (10-279), P_1 по (10-280), $P_{эм}=E_2I_2$, $P_д=k^2P_{д.н}$, $P_2=P_{эм}-P_{c\Sigma}-P_{мх\,\Sigma}-P_д$, $P_\Sigma=P_1-P_2$, η по (4-2), M_2 по (10-284). После расчета строят на графиках зависимости n, M_2, η, $I=f(P_2)$.

Расчет рабочих характеристик генераторов с параллельным возбуждением (без автоматического или ручного поддержания $U=\mathrm{const}$) проводится в следующем порядке. Задаются коэффициентами $k=E_2/E_{2н}$, равными 0,3; 0,5; 0,8; 1,0; 1,1, и вычисляют для этих коэффициентов $E_2=kE_{2н}$. Затем для каждого значения E_2 определяют Ф по (10-162), F_Σ по характеристике намагничивания машины. Ток в якоре (А)

$$I_2=(E_2-\Delta U_щ-k_2F_\Sigma)/(k_1k_2+m_тr_{2\Sigma}), \qquad (10\text{-}291)$$

где $k_1=F_{р2н}/I_{2н}$; $k_2=U_н/F_{п.н}$.

Напряжение генератора (В)

$$U=E_2-I_2m_тr_{2\Sigma}-\Delta U_щ. \qquad (10\text{-}292)$$

При к. з. ($U=0$) и наличии остаточной ЭДС $E_{2ост}=0{,}05U_н$ ток (А)

$$I_{к.з}=(E_{2ост}-\Delta U_щ)/(m_тr_{2\Sigma}). \qquad (10\text{-}293)$$

Ток в параллельной обмотке генератора (А)

$$I_п=I_{п.н}U/U_н. \qquad (10\text{-}294)$$

Ток генератора (А)

$$I=I_2-I_п. \qquad (10\text{-}295)$$

Мощность генератора (Вт)

$$P_2=UI. \qquad (10\text{-}296)$$

Затем определяют $P_{м\Sigma}=I^2_2m_тr_{2\Sigma}$; $P_{к.щ}=2I_2$; $P_{м.п}$ по (10-286); $P_{c\Sigma}=P_{c\Sigma н}(\Phi/\Phi_н)^2$; $P_д=P_{д.н}(I/I_н)^2$; $P_\Sigma=P_{м\Sigma}+P_{к.щ}+P_{м.п}+P_{мх\,\Sigma}+P_{c\Sigma}+P_д$; $P_1=P_2+P_\Sigma$; η по (4-2). После расчета строят на графиках зависимости U, $\eta=f(P_2)$.

Рабочие характеристики генератора с независимым возбуждением (без автоматического или ручного поддержания $U=\mathrm{const}$) рассчитывают в такой последовательности. Задаются коэффициентом нагрузки $k=I_2/I_{2н}$, равным 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1,25, и вычисляют для этих нагрузок ток $I_2=kI_{2н}$. Затем для каждого значения тока определяют $F_{р2}=kF_{р2н}$, $F_\Sigma=F_п-F_{р2}$, Ф — по характе-

12. Рабочие характеристики

Номер расчета	Условные обозначения	Двигатель № 1						Двигатель № 2					
308	k	0,100	0,250	0,50	0,750	1,00	1,250	0,100	0,250	0,50	0,750	1,000	1,250
309	$I_2=kI_{2н}$, А	2,930	7,320	14,65	21,97	29,3	36,62	37,33	93,32	186,65	279,97	373,3	466,62
310	E_2 по (10-159), В	216,4	214,1	210,2	206,3	202,3	198,4	216,8	215,0	212,0	209,0	206,1	203,1
311	$F_{р2}=kF_{р2н}$, А	10,00	26,00	52,0	79,0	105	131,0	88,0	219,0	438,0	658,0	877,0	1096
312	$F_{пос}=kF_{пос.н}$, А	15,00	36,00	73,0	109,0	146	182,0	75,0	187,0	373,0	560,0	747,0	933,0
313	$F_\Sigma=F_п+F_{пос}-F_{р2}$, А	1294	1299	1310	1319	1330	1340	3204	3185	3152	3 119	3087	3054
314	Ф по характеристике намагничивания, Вб	$7,6\times10^{-3}$	$7,62\times10^{-3}$	$7,65\times10^{-3}$	$7,7\times10^{-3}$	$7,75\times10^{-3}$	$7,76\times10^{-3}$	$31,6\times10^{-3}$	$31,5\times10^{-3}$	$31,4\times10^{-3}$	$31,3\times10^{-3}$	$31,23\times10^{-3}$	$31,1\times10^{-3}$
315	$n=\dfrac{30E_2}{(p/a)\,w_2\Phi}$, об/мин	1636	1615	1579	1540	1500	1469	1040	1034	1023	1 012	1000	989,00
316	I по (10-279), А	3,980	8,37	15,7	23,02	30,35	37,67	42,79	98,78	192,11	285,43	378,76	472,08
317	P_1 по (10-280), Вт	876,0	1841	3454	5064	6677	8287	9414	21 732	42264	62 795	83 327	103 858
318	$P_{эм}=E_2I_2$, Вт	634,0	1567	3079	4532	5928	7265	8093	20 064	39 570	58 514	76 940	94 771
319	$P_д=k^2P_{д.н}$, Вт	1,000	4,00	17,0	38,0	67,0	105,0	8,00	52,000	207	466	829	1 295
320	$P_2=P_{эм}-P_{с\Sigma}-P_{мх\Sigma}-P_д$, Вт	272,0	1202	2701	4133	5500	6802	6974	18 901	38 252	56 937	75 000	92 385
321	$P_\Sigma=P_1-P_2$, Вт	598,0	639	753	931	1177	1485	2440	28 310	4012	5 858	8 327	11 473
322	η по (4-2), о. е.	0,320	0,653	0,782	0,816	0,824	0,821	0,741	0,8700	0,905	0,907	0,900	0,890
323	M_2 по (10-284) Н·м	1,590	7,11	16,34	25,63	35,02	44,22	64,04	174,57	357,09	537,30	716,25	892,00

Примечания; 1. Графики с рабочими характеристиками двигателя № 1 приведены на рис. 10-32,*а*; а двигателя № 2—на рис. 10-32,*б*.
2. Значение $F_п$ для п. 313 берется из п. 306.

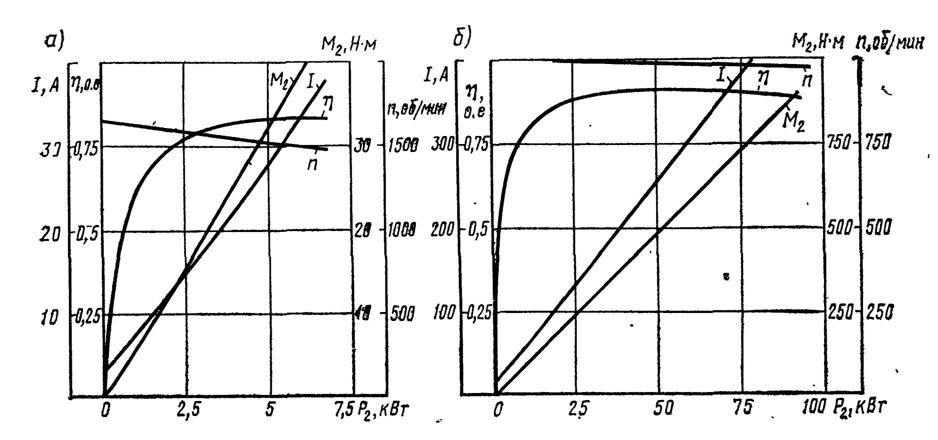
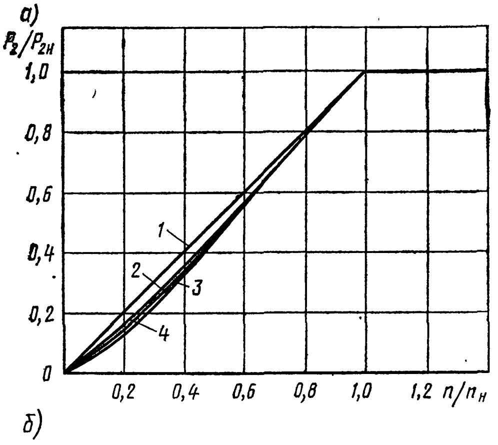


Рис. 10-32. Рабочие характеристики двигателя № 1 (*а*) и двигателя № 2 (*б*)

ристике намагничивания машины, $E_2=(p/a)nw_2\Phi/30$, U по (10-292), I — по (10-295), P_2 — по (10-296). Потери и КПД вычисляют так же, как для генераторов с параллельным возбуждением. После расчета строят на графиках зависимости U, $\eta=f(P_2)$.



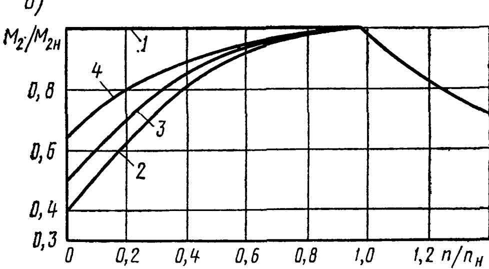


Рис. 10-33. Зависимость $P_2/P_{2н}=f(n/n_н)$ (*а*) и $M_2/M_{2н}=f(n/n_н)$ (*б*):

1 — исполнение по защите IP22 или IP44, способы охлаждения IC17 и IC37; *2* — исполнение по защите IP22, способ охлаждения IC01; *3* — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141; *4* — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0041

§ 10-15. Регулирование частоты вращения

Частоту вращения n двигателей обычно регулируют вверх от номинального значения — уменьшением тока возбуждения и вниз — уменьшением напряжения на якоре. Из условий нагрева и коммутации ток якоря I_2 целесообразно поддерживать на уровне номинального значения. Таким образом, при регулировании частоты вращения вверх мощность на валу P_2 (при $\eta\approx$const) будет постоянной, равной номинальной, а при регулировании вниз — момент вращения на валу M_2 будет постоянным, также равным номинальному моменту. Поддержание $P_2=$const при регулиро-

вании вверх возможно при всех способах охлаждения, а M_2=const при регулировании вниз — только при независимой вентиляции (способы охлаждения IC17, IC37), на эффект которой практически не влияет частота вращения.

При самовентиляции (способы охлаждения IC01, IC0141, IC0041) M_2 с понижением n уменьшается как за счет необходимости снижения I_2, так и $I_п$. На рис. 10-33,*а* приведены примерные зависимости в относительных единицах $P_2=f(n)$, а на рис. 10-33,*б* — $M_2=f(n)$ при различных способах охлаждения. При снижении n указанных двигателей можно принимать, что I_2 и Φ уменьшаются каждый пропорционально $\sqrt{M_2}$. Допустимость принятых из рис. 10-33,*б* значений M_2 при самовентиляции целесообразно проверить тепловым расчетом и при необходимости скорректировать M_2.

При регулировании вверх рассчитывают только режим работы, соответствующий n_{max}, указанному в задании на проектирование. При $n_{max}/n_н \geqslant 2$ размагничивающим действием реакции якоря пренебрегают вследствие малого насыщения магнитной цепи. При расчете определяют также частоту вращения на холостом ходу при предельно ослабленном магнитном поле.

Регулирование частоты вращения рассчитывают в такой последовательности.

Регулирование частоты вращения вверх

Магнитный поток при наибольшей частоте вращения (Вб)	$\Phi_{min}=\Phi_н n_н/n_{max}$	(10-297)
МДС при минимальном магнитном потоке (А)	$F_{\Sigma min}$ — по характеристике намагничивания (10-298)	
Минимальный ток возбуждения (А)	$I_{п\,min}=F_{\Sigma\,min}/w_п$	(10-299)
Максимальная величина регулирующего сопротивления (Ом)	$r_р=1{,}3(U_п/I_{п\,min}-r_п)$	(10-300)
Частота вращения при холостом ходе (об/мин)	$n_{0\,max}=\dfrac{30(U-2)}{(p/a)\Phi_{min}w_2}$	(10-301)

Регулирование частоты вращения вниз

Допустимый момент вращения на валу при наименьшей частоте вращения двигателя с самовентиляцией (Н·м)	M_2 — из рис. 10-33,*б*	(10-302)
То же, у двигателя с независимой вентиляцией	$M_2=M_{2н}$	(10-303)
Магнитный поток при n_{min} у двигателя с самовентиляцией (Вб)	$\Phi=\sqrt{M_2/M_{2н}}\,\Phi_н$	(10-304)
То же, у двигателя с независимой вентиляцией	$\Phi=\Phi_н$	(10-305)
Ток якоря при n_{min} у двигателя с самовентиляцией (А)	$I_2=\sqrt{M_2/M_{2н}}\,I_{2н}$	(10-306)
То же, у двигателя с независимой вентиляцией	$I_2=I_{2н}$	(10-307)
ЭДС при n_{min} (В)	$E_{2\,min}=\dfrac{\Phi p/a n_{min}w_2}{30}$	(10-308)

Напряжение на якоре при n_{min} (В) — $U_{min} = E_{2\,min} + I_2 m_т r_{2\Sigma} + \Delta U_щ$ (10-309)

Результирующая МДС при n_{min} (А) — $F_{\Sigma\,min}$ — по характеристике намагничивания (10-310)

Размагничивающая МДС реакции якоря (А) — $F_{р2} = (I_2/I_{2н}) F_{р2н}$ (10-311)

МДС стабилизирующей обмотки (А) — $F_{пос} = (I_2/I_{2н}) F_{пос.н}$ (10-312)

МДС обмотки возбуждения главных полюсов (А) — $F_{п\,min} = F_{\Sigma\,min} + F_{р2} - F_{пос}$ (10-313)

Ток обмотки возбуждения (А) — $I_{п\,min} = F_{п\,min}/w_п$ (10-314)

Максимальная величина регулирующего сопротивления (Ом) — $r_р = 1,3(U_п/I_{п\,min} - r_п)$ (10-315)

Примеры расчета машин

13. Регулирование частоты вращения

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
		Регулирование частоты вращения вверх		
324	Φ_{min}, Вб	(10-297)	$7,75\cdot10^{-3}\cdot1500/3000 = 3,87\cdot10^{-3}$	$31,23\cdot10^{-3}\cdot1000/2000 = 15,61\cdot10^{-3}$
325	F_Σ, А	(10-298)	573	1297
326	$I_{п\,min}$, А	(10-299)	573/1400=0,409	1297/670=1,936
327	$r_р$, Ом	(10-300)	1,3 (220/0,409—151,6)= =502	1,3 (220/1,936—29,18)= =110
328	$n_{0\,max}$, об/мин	(10-301)	$\dfrac{30\,(220-2)}{\frac{2}{1}\cdot3,87\cdot10^{-3}\cdot261} = 3237$	$\dfrac{30\,(220-2)}{\frac{2}{1}\cdot15,61\cdot10^{-3}\cdot99} = 2116$
		Регулирование частоты вращения вниз		
329	M_2, Н·м	(10-302)	0,81·35,09=28,42	0,75·717,75=538,31
330	Φ, Вб	(10-304)	$\sqrt{0,81}\cdot7,75\cdot10^{-3} = 6,97\cdot10^{-3}$	$\sqrt{0,75}\cdot31,23\cdot10^{-3} = 27,05\cdot10^{-3}$
331	I_2, А	(10-306)	$\sqrt{0,81}\cdot29,3 = 26,37$	$\sqrt{0,75}\cdot373,3 = 323,29$
332	E_{2min}, В	(10-308)	$\dfrac{6,97\cdot10^{-3}\,(2/1)\times500\cdot261}{30} = 60,63$	$\dfrac{27,05\cdot10^{-3}\,(2/1)\times300\cdot99}{30} = 53,6$
333	U_{min}, В	(10-309)	60,63+26,37·0,535+ +2=77	53,6+316,7·0,032+2= =65,7
334	$F_{\Sigma\,min}$, А	(10-310)	1090	2400
335	$F_{р2}$, А	(10-311)	$\sqrt{0,81}\cdot105 = 94$	$\sqrt{0,75}\cdot877 = 760$
336	$F_{пос}$, А	(10-312)	$\sqrt{0,81}\cdot146 = 131$	$\sqrt{0,75}\cdot747 = 647$
337	$F_{п\,min}$, А	(10-313)	1090+94—131=1053	2400+760—647=2513
338	$I_{п\,min}$, А	(10-314)	1053/1400=0,75	2513/670=3,75
339	$r_р$, Ом	(10-315)	1,3 (220/0,75—151,6)= =184	1,3 (220/3,75—29,18)= =38,3

§ 10-16. Тепловой и вентиляционный расчеты

Тепловой расчет машины постоянного тока. Расчет проводим по упрощенной методике, изложенной в § 5-3. Начинают с определения потерь при сопротивлениях, приведенных к максимально допускаемой температуре, площадей поверхностей охлаждения и удельных тепловых потоков, приходящихся на единицу этих площадей. Затем с учетом установленных практикой электромашиностроения коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности определяют превышения температуры обмоток и коллектора.

При расчете приняты следующие положения и допущения.

1. Потери в обмотках, за исключением параллельной или независимой обмоток главных полюсов, вычисляют при сопротивлении, приведенном к максимально допускаемой температуре, для чего сопротивление, определенное при 20 °С, умножают на коэффициент $m'_т$ (см. § 5-1). Потери $P_{м.п}=U_пI_п=U^2_п/r_п$; следовательно, наиболее неблагоприятные условия для этой обмотки не соответствуют сопротивлению, приведенному к максимально допускаемой температуре, и их принимают равными вычисленным ранее для определения КПД.

2. При определении $\Delta t_в$ в (10-339) принимают, что воздух внутри машины нагревается суммой всех потерь за вычетом части потерь в обмотках возбуждения главных и добавочных полюсов, а также в компенсационной обмотке, передаваемых непосредственно через сердечники полюсов и станину наружному охлаждающему воздуху; у машин со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141, кроме того, исключают потери на трение о воздух наружного вентилятора, составляющие $\sim 0{,}9(P_{т.п}+P_{вен})$. Доля потерь указанных выше обмоток, которые нагревают воздух внутри машины, равна коэффициенту k:

Исполнение по степени защиты и способу охлаждения	IP22; IC01	IP22; IC17	IP44; IC37	IP44; IC0141	IP44; IC0041
Коэффициент k	0,9	0,9	0,9	0,7	0,6

3. Для обмоток, выполняемых с изоляцией «Монолит», у машин со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01, а также у машин со степенью защиты IP22, IP44 и способами охлаждения IC17, IC37 значения $\Delta t'_2$, полученные из (10-335), снижают на 20%, а значения $\Delta t'_п$ из (10-374) и $\Delta t'_д$ из (10-368) — на 30%.

4. Формулы (10-332) и (10-334) соответствуют машинам с полузакрытыми пазами якоря. Первый член в скобках учитывает перепад температуры в изоляции пазов или лобовых частей обмотки якоря, а второй — в изоляции круглых проводов катушек обмотки. Для машин с открытыми пазами якоря и обмоткой из прямоугольных проводов применяют эти же формулы, причем второй член в виду его малой величины принимают равным нулю. Для обмоток якорей, не имеющих наружной изоляции катушек в

лобовых частях, первый член, указанный в скобках формулы (10-334), принимают равным нулю.

5. При отсутствии аксиальных вентиляционных каналов в якоре второй член в скобках формулы (10-320) принимают равным нулю.

6. Формулы (10-373) и (10-367) для обмоток главных и добавочных полюсов соответствуют выполнению обмоток из круглого провода; первый член в скобках учитывает перепад температуры в наружной изоляции катушек, а второй — в изоляции круглых проводов катушек. При прямоугольных изолированных проводах применяют эти же формулы, причем второй член, в виду его малой величины у прямоугольных проводов, принимают равным нулю. Для обмоток, не имеющих наружной изоляции катушек, первый член в скобках указанных формул принимают равным нулю.

7. Периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушек обмоток возбуждения главных $П_п$ и добавочных $П_д$ полюсов может быть рассчитан по эскизу размещения обмоток в междуполюсном окне. При этом поверхности катушек, прилегающие к сердечникам полюсов, не учитываются. Приближенные значения $П_п$ и $П_д$ в зависимости от количества полюсов представлены ниже:

Количество полюсов $2p$	2	4
Для периметра $П_п$ катушки:		
из одной шайбы	$38+0{,}2D_{н2}$	$37+0{,}14D_{н2}$
из двух или нескольких шайб	—	$60+0{,}2D_{н2}$
Для периметра $П_д$ катушки многослойные из изолированных проводов	$40+0{,}17D_{н2}$	$12+0{,}33D_{н2}$

8. Последовательную стабилизирующую обмотку главных полюсов, выполняемую из таких же проводов как обмотку добавочных полюсов, тепловому расчету не подвергают.

9. Машины со степенью защиты IP44 и способами охлаждения IC0141 и IC0041, изготовляемые с относительно небольшой мощностью (до ~50 кВт), компенсационной обмотки не имеют, поэтому в (10-337) и (10-338) не указаны потери в компенсационной обмотке.

Тепловой расчет обмоток и коллектора машины, работающей в номинальном режиме, производят в такой последовательности.

Потери в обмотках и контактах щеток

Потери в обмотке якоря (Вт)	$P'_{м2}=I^2_2 m'_т r_2$	(10-316)
Потери в компенсационной обмотке (Вт)	$P'_{м1}=I^2_2 m'_т r_1$	(10-317)
Потери в обмотке добавочных полюсов (Вт)	$P'_{м.д}=I^2_2 m'_т r_д$	(10-318)
Потери в стабилизирующей последовательной обмотке (Вт)	$P'_{м.пос}=I^2_2 m'_т r_{пос}$	(10-319)
Потери в параллельной или независимой обмотке главных полюсов (Вт)	$P_{м.п}$ — по (10-286)	
Потери в контактах щеток (Вт)	$P_{к.щ}$ — по (10-287)	

Здесь при стержневой компенсационной обмотке $P'_{м1}=P'_{м.ст}+P'_{м.д1}$, где потери в стержнях $P'_{м.ст}=I^2_2 m'_т r_{ст}$, а потери в дугах $P'_{м.д1}=I^2_2 m'_т r_{д1}$.

Обмотка якоря

Условная поверхность охлаждения активной части якоря (мм²)

$$S_{п2}=(\pi D_{н2}+n_{к2}d_{к2})l_2 \qquad (10\text{-}320)$$

Условный периметр поперечного сечения овального полузакрытого паза (мм)

$$\Pi_2=\pi(r_1+r_2)+2h_1 \qquad (10\text{-}321)$$

То же, прямоугольного открытого паза

$$\Pi_2=2(h_{п2}+b_{п2}) \qquad (10\text{-}322)$$

Условная поверхность охлаждения пазов (мм²)

$$S_{и.п2}=Z_2\Pi_2 l_2 \qquad (10\text{-}323)$$

То же, лобовых частей обмотки при отсутствии аксиальных вентиляционных каналов в якоре

$$S_{л2}=2\pi D_{н2}l_{в2} \qquad (10\text{-}324)$$

То же, лобовых частей обмотки при наличии аксиальных вентиляционных каналов в якоре

$$S_{л2}=3\pi D_{н2}l_{в2} \qquad (10\text{-}325)$$

То же, машины

$$S_{маш}=\pi D_{н1}(l_2+2l_{в2}) \qquad (10\text{-}326)$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки и от потерь в стали, отнесенных к поверхности охлаждения активной части якоря (Вт/мм²)

$$p_{п2}=(P'_{м2}2l_2/l_{ср2}+P_{с\Sigma})/S_{п2} \qquad (10\text{-}327)$$

То же, от потерь в активной части обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения пазов

$$p_{и.п2}=(P'_{м2}2l_2/l_{ср2})/S_{и.п2} \qquad (10\text{-}328)$$

То же, от потерь в лобовых частях обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки

$$p_{л2}=(P'_{м2}2l_{л2}/l_{ср2})/S_{л2} \qquad (10\text{-}329)$$

Окружная скорость якоря при номинальной частоте вращения (м/с)

$$v_{2н}=\pi D_{н2}n/60\,000 \qquad (10\text{-}330)$$

Превышение температуры поверхности активной части якоря над температурой воздуха внутри машины (°С)

$$\Delta t_{п2}=p_{п2}/\alpha_2 \qquad (10\text{-}331)$$

Перепад температуры в изоляции паза и проводов (°С)

$$\Delta t_{и.п2}=p_{и.п2}\left(\frac{b_{и2}}{\lambda_{экв}}+\frac{r_1+r_2}{8\lambda'_{экв}}\right) \qquad (10\text{-}332)$$

Превышение температуры поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины (°С)

$$\Delta t_{л2}=\frac{p_{л2}}{\alpha_2} \qquad (10\text{-}333)$$

Перепад температуры в изоляции катушек и проводов лобовых частей обмотки (°С)

$$\Delta t_{и.л2}=p_{л2}\left(\frac{b_{и.л2}}{\lambda_{экв}}+\frac{h_{к2}}{8\lambda'_{экв}}\right) \qquad (10\text{-}334)$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины (°С)

$$\Delta t'_2=(\Delta t_{п2}+\Delta t_{и.п2})2l_2/l_{ср2}+(\Delta t_{л2}+\Delta t_{и.л2})2l_{л2}/l_{ср2} \qquad (10\text{-}335)$$

Сумма потерь в машине со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01, со степенью защиты IP22, IP44 и способами охлаждения IC17, IC37, передаваемая воздуху внутри машины (Вт)

$$P'_\Sigma=P'_{м2}+P'_{м1}2l_{л1}/l_{ср1}+k(P'_{м.д}+P'_{м.пос}+P'_{м1}2l_{п}/l_{ср1}+P_{м.п})+P_{к.щ}+P'_{мх\Sigma}+P_{с\Sigma}+P_{д} \qquad (10\text{-}336)$$

То же, в машине со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141

$$P'_\Sigma=P'_{м2}+k(P'_{м.д}+P'_{м.пос}+P_{м.п})+P_{к.щ}+P_{т.щ}+0{,}1(P_{т.п}+P_{вен})+P_{с\Sigma}+P_{д} \qquad (10\text{-}337)$$

То же, в машине со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0041

$$P'_\Sigma=P'_{м2}+k(P'_{м.д}+P'_{м.пос}+P_{м.п})+P_{к.щ}+P_{мх\Sigma}+P_{с\Sigma}+P_{д} \qquad (10\text{-}338)$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой наружного охлаждающего воздуха (°C)	$\Delta t_в = P'_\Sigma / (\alpha_в S_{маш})$	(10-339)
Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой наружного охлаждающего воздуха (°C)	$\Delta t_2 = \Delta t'_2 + \Delta t_в$	(10-340)

Здесь: k приведен в § 10-16; α_2 — коэффициент теплоотдачи поверхности якоря — из рис. 10-34; $\alpha_в$ — коэффициент подогрева воздуха — из рис. 10-35; $b_{и2}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу якоря; $b_{и2}$ при полузакрытых пазах — по данным § 10-4, при открытых пазах $b_{и2} = (b_{п2} - N_ш a)/2$; $b_{и.л2}$ —

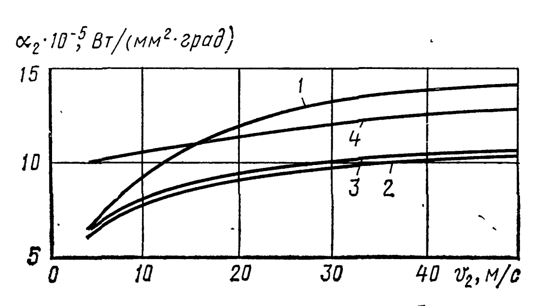


Рис. 10-34. Средние значения $\alpha_2 = f(v_2)$ машин постоянного тока:

1 — исполнение по защите IP22, способ охлаждения IC01, полузакрытые пазы якоря; *2* — то же, что *1*, но открытые пазы; *3* — IP44, IC0141 или IC0041, полузакрытые пазы; *4* — IP22 и IP44, IC17 или IC37 открытые пазы

односторонняя толщина изоляции катушек в лобовых частях — по данным приложений 24—26; $\lambda_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции в пазу (включающей воздушные прослойки), равный $16 \cdot 10^{-5}$ Вт/(мм·град); $\lambda'_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности внутренней изоляции катушек, зависящий от отношения d/d' — из рис. 9-26.

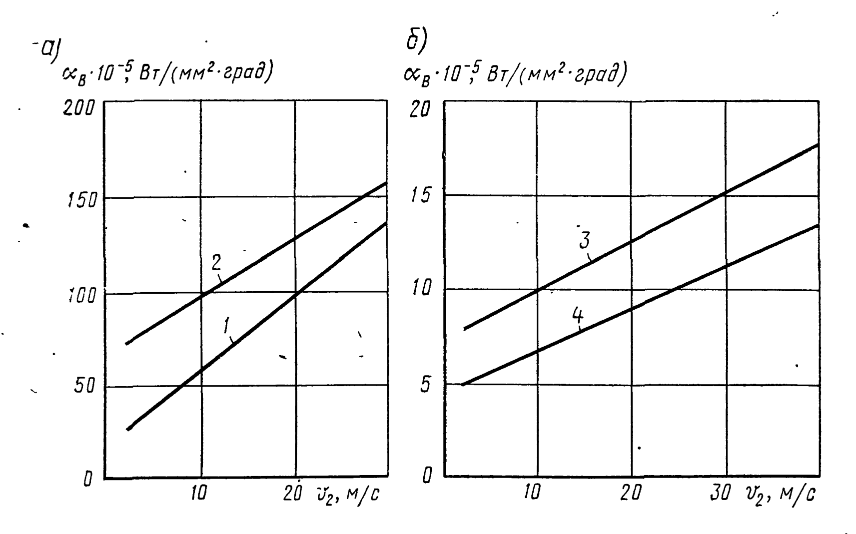


Рис. 10-35. Средние значения $\alpha_в = f(v_2)$ машин постоянного тока:

1 — исполнение по защите IP22, способ охлаждения IC01; *2* — исполнение по защите IP22 или IP44, способ охлаждения IC17 или IC37; *3* — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141; *4* — то же, что *3*, но способ охлаждения IC0041

Условная поверхность охлаждения полюсных наконечников и вылетов стержней (мм²)	$S_1=2pb_{\text{н.п}}l_{\text{ст}}$	(10-341)
Условный периметр поперечного сечения паза (мм)	$\Pi_1=2(h_{\text{п}1}+b_{\text{п}1})$	(10-342)
Условная поверхность охлаждения пазов (мм²)	$S_2=2pZ_1\Pi_1 l_{\text{п}}$	(10-343)
То же, дуг обмотки	$S_3=2pN_1 l_{\text{ср.д}1}(a_{\text{д}1}+b_{\text{д}1})$	(10-344)
Удельный тепловой поток от потерь в стержнях, отнесенных к поверхности охлаждения полюсных наконечников и вылетов стержней (Вт/мм²)	$p_{\text{ст}}=kP'_{\text{м.ст}}/S_1$	(10-345)
То же, отнесенных к поверхности охлаждения пазов	$p_{\text{и.ст}}=kP'_{\text{м.ст}}/S_2$	(10-346)
Удельный тепловой поток от потерь в дугах, отнесенных к поверхности охлаждения дуг (Вт/мм²)	$p_{\text{д}1}=P'_{\text{м.д}1}/S_3$	(10-347)
Превышение температуры поверхности полюсных наконечников и вылетов стержней над температурой воздуха внутри машины (°С)	$\Delta t_{\text{ст}}=p_{\text{ст}}/\alpha'_1$	(10-348)
Перепад температуры в изоляции пазов (°С)	$\Delta t_{\text{и.ст}}=p_{\text{и.ст}}b_{\text{и}1}/\lambda_{\text{экв}}$	(10-349)
Превышение температуры поверхности охлаждения дуг над температурой воздуха внутри машины (°С)	$\Delta t_{\text{д}1}=p_{\text{д}1}/\alpha'_1$	(10-350)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины (°С)	$\Delta t'_1=\dfrac{(\Delta t_{\text{ст}}+\Delta t_{\text{и.ст}})l_{\text{ст}}+\Delta t_{\text{д}1}l_{\text{ср.д}1}}{l_{\text{ст}}+l_{\text{ср.д}1}}$	(10-351)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного охлаждающего воздуха (°С)	$\Delta t_1=\Delta t'_1+\Delta t_{\text{в}}$	(10-352)

Здесь α'_1 — коэффициент теплоотдачи поверхности охлаждения полюсных наконечников и стержней; у машин со способами охлаждения IC17 и IC37 $\alpha'_1\approx(6{,}8+3\cdot10^{-3}D_{\text{н}2})\cdot10^{-5}$ Вт/(мм²·град); при самовентиляции (IC01) значения

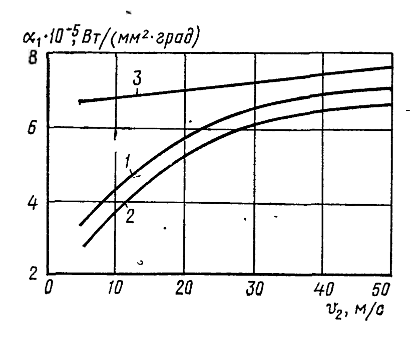


Рис. 10-36. Средние значения $\alpha_1=f(v_2)$ машин постоянного тока: 1—исполнение по защите IP22, способ охлаждения IC01; 2 — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141 или IC0041; 3 — исполнение по защите IP22 или IP44, способ охлаждения IC17 или IC37

α'_1 принимают равными $1{,}25\alpha_1$ из рис. 10-36; для дуг указанные выше значения α'_1 уменьшают в два раза; $b_{\text{и}1}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу, мм; $b_{\text{и}1}=(b_{\text{п}1}-N_{\text{ш}}a_{\text{ст}})/2$.

Секционная компенсационная обмотка

Условная поверхность охлаждения полюсных наконечников (мм²)	S_1 — по (10-341) с подстановкой $l_п$ вместо $l_{ст}$	
Условный периметр поперечного сечения паза (мм)	$П_1$ — по (10-342)	
Условная поверхность охлаждения пазов (мм²)	S_2 — по (10-343)	
То же, лобовых частей обмотки	$S_3=2pZ_1l_{л1}(h_{п1}/2+2b_{п1})$	(10-353)
Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки, отнесенный к поверхности охлаждения полюсных наконечников (Вт/мм²)	$p_{п1}=\dfrac{kP'_{м1}2l_п/l_{ср1}}{S_1}$	(10-354)
То же, отнесенный к поверхности охлаждения пазов	$p_{и.п1}=\dfrac{kP'_{м1}2l_п/l_{ср1}}{S_2}$	(10-355)
Удельный тепловой поток от потерь в лобовых частях обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения секций в лобовых частях обмотки (Вт/мм²)	$p_{л1}=\dfrac{P'_{м1}2l_{л1}/l_{ср1}}{S_3}$	(10-356)
Превышение температуры поверхности полюсных наконечников над температурой воздуха внутри машины (°C)	$\Delta t_{п1}=p_{п1}/\alpha'_1$	(10-357)
Перепад температуры в изоляции пазов (°C)	$\Delta t_{и.п1}=p_{и.п1}b_{и1}/\lambda_{экв}$	(10-358)
Превышение температуры поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины (°C)	$\Delta t_{л1}=p_{л1}/\alpha'_1$	(10-359)
Перепад температуры в изоляции лобовых частей обмотки (°C)	$\Delta t_{и.л1}=p_{л1}b_{и.л1}/\lambda_{экв}$	(10-360)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины (°C)	$\Delta t'_1=(\Delta t_{п1}+\Delta t_{и.п1})2l_п/l_{ср1}+(\Delta t_{л1}+\Delta t_{и.л1})2l_{л1}/l_{ср1}$	(10-361)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного охлаждающего воздуха (°C)	$\Delta t_1=\Delta t'_1+\Delta t_в$	(10-362)

Здесь α'_1 принимается таким же, как для стержней стержневой компенсационной обмотки; $b_{и1}=(b_{п1}-N_ш b)/2$; $b_{и.л1}$ — односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки — из приложения 35.

Обмотка добавочных полюсов

Условная поверхность охлаждения многослойных катушек из изолированных проводов (мм²)	$S_д=2p_дl_{ср.д}П_д$	(10-363)
То же, однослойных катушек обмотки из неизолированных проводов, намотанных на ребро	$S_д=2p_дl_{ср.д}(w_дa+0{,}6b)$	(10-364)
Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесенных к поверхности охлаждения обмотки (Вт/мм²)	$p_д=kp'_{м.д}/S_д$	(10-365)
Превышение температуры наружной поверхности охлаждения обмотки (°C)	$\Delta t_{в.д}=p_д/\alpha'_1$	(10-366)

Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции многослойных катушек обмотки из изолированных проводов (°С)	$\Delta t_{и.д} = p_д \left(\frac{b_{и.д}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_{к.д}}{8\lambda'_{экв}} \right)$	(10-367)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины (°С)	$\Delta t'_д = \Delta t_{п.д} + \Delta t_{и.д}$	(10-368)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного охлаждающего воздуха (°С)	$\Delta t_д = \Delta t'_д + \Delta t_в$	(10-369)

Здесь $П_д$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки — из эскиза размещения обмоток в междуполюсном окне или из § 10-16; α_1 — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности охлаждения обмотки возбуждения, выполненной из изолированных проводов, приведен на рис. 10-36; для обмотки, выполненной из неизолированных проводов, намотанных на ребро, α_1 из рис. 10-36 увеличивают в 1,7 раза; $b_{и.д}$ — односторонняя толщина наружной изоляции катушки, в среднем равная 0,2 мм; $b_{к.д}$ — из эскиза размещения обмоток в междуполюсном окне или по (10-132), (10-133).

Параллельная и независимая обмотка главных полюсов

Условная поверхность охлаждения всех катушек (мм²)	$S_п = 2pl_{ср.п}П_п$	(10-370)
Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесенных к поверхности охлаждения обмотки (Вт/мм²)	$p_п = kP_{м.п}/S_п$	(10-371)
Превышение температуры наружной поверхности охлаждения обмотки над температурой воздуха внутри машины (°С)	$\Delta t_{п.п} = p_п/\alpha_1$	(10-372)
Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции обмотки (°С)	$\Delta t_{и.п} = p_п \left(\frac{b_{и.п}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_{к.п}}{8\lambda'_{экв}} \right)$	(10-373)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины (°С)	$\Delta t'_п = \Delta t_{п.п} + \Delta t_{и.п}$	(10-374)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного охлаждающего воздуха (°С)	$\Delta t_п = \Delta t'_п + \Delta t_в$	(10-375)

Здесь $П_п$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки — из эскиза размещения обмоток в междуполюсном окне или из § 10-16; $b_{и.п}$ — односторонняя толщина наружной изоляции катушки, в среднем равная 0,2 мм; $b_{к.п}$ — из эскиза размещения обмоток в междуполюсном окне или по (10-222), (10-223).

Коллектор

Условная поверхность охлаждения коллектора (мм²)	$S_к = \pi D_к / l_к$	(10-376)
Удельный поток от потерь на коллекторе, отнесенных к поверхности охлаждения коллектора (Вт/мм²)	$p_к = (P_{к.щ} + P_{т.щ})/S_к$	(10-377)
Превышение температуры коллектора над температурой воздуха внутри машины (°С)	$\Delta t'_к = p_к/\alpha_к$	(10-378)

Превышение температуры коллектора над температурой наружного охлаждающего воздуха у машин со степенями защиты и способами охлаждения IP22; IC01; IP22; IC17; IP44; IC37, со входом воздуха со стороны коллектора (°C)	$\Delta t_к = \Delta t'_к$	(10-379)
То же, с входом воздуха со стороны, противоположной коллектору	$\Delta t_к = \Delta t'_к + 2\Delta t_в$	(10-380)
Превышение температуры коллектора над температурой наружного охлаждающего воздуха у машин со степенью защиты IP44 и способами охлаждения IC0141, IC0041 (°C)	$\Delta t_к = \Delta t'_к + \Delta t_в$	(10-381)

Здесь $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи поверхности коллектора, Вт/мм² — из рис. 10-37.

Вентиляционный расчет при способе охлаждения IC01 и аксиальной системе самовентиляции. Расчет производится в соответствии с § 5-6. Напор H, а следовательно, и расход охлаждающего воздуха $V_в$, проходящего через машину с самовентиляцией, ограничены размерами встраиваемого вентилятора, главным образом его наружным диаметром, зависящим от внутреннего диаметра станины D_1. У машин с независимой вентиляцией такого ограничения нет, поэтому расход воздуха при этом виде вентиляции выбирают на 15—20% больше расчетного; соответственно увеличивается H.

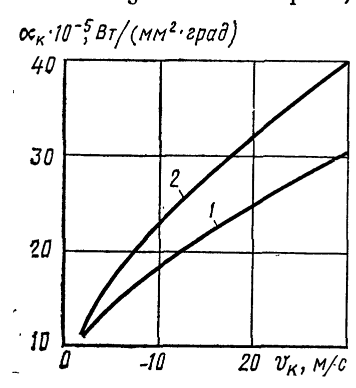


Рис. 10-37. Средние значения $\alpha_к = f(v_к)$:

1 — коллекторы без аксиальных каналов; 2 — коллекторы с аксиальными каналами

Определение величины Z (см. § 5-6) для воздухопровода со сложной конфигурацией затруднительно, поэтому при расчете целесообразно пользоваться зонами средних значений, приведенными на рис. 5-5.

Действительный расход воздуха $V_в$ из (5-38) должен быть не менее вычисленного по (5-28). Если полученный расход воздуха недостаточен, следует увеличить наружный $D_{вен2}$ и уменьшить внутренний диаметр вентилятора $D_{вен1}$, либо увеличить $l_л$.

Размеры $D_{вен2}$, $D_{вен1}$ и $l_л$, вычисляемые при расчете, округляют до ближайшего целого числа; количество лопаток $N_л$ округляют до ближайшего простого числа. Расчет вентиляции ведется при определенной заданной частоте вращения n. При других значениях частоты вращения $V_в$ и $V_{в\,max}$ пропорциональны n, а $H \equiv n^2$.

Расчет вентиляции проводят в такой последовательности.

Наружный диаметр вентилятора (мм)	$D_{вен2} = (0{,}8 \div 0{,}9) D_1$	(10-382)
Внутренний диаметр колеса вентилятора (мм)	$D_{вен1} = (0{,}62 \div 0{,}67) D_1$	(10-383)

Длина лопатки вентилятора (мм)	$l_л = (0,12 \div 0,14) D_1$	(10-384)
Количество лопаток вентилятора	$N_л \approx D_{вен2}/20$	(10-385)
Линейная скорость вентилятора по наружному диаметру (м/с)	$v_{вен2}$ — по (5-34)	
То же, по внутреннему диаметру	$v_{вен1}$ — по (5-35)	
Напор вентилятора при холостом ходе (Па)	H_0 — по (5-33)	
Площадь поперечного сечения входных отверстий вентилятора (м²)	$S_{вен}$ — по (5-37)	
Максимальное количество воздуха у вентилятора (м³/с)	$V_{в\,max}$ — по (5-36)	
Действительный расход воздуха (м³/с)	$V_в$ — по (5-38)	
Действительный напор вентилятора (Па)	H — по (5-39)	

Расчет вентиляции при способе охлаждения IC0141 производят также согласно материалам § 5-6 [уравнения (5-42)—(5-45)].

Примеры расчета машин

14. Тепловой и вентиляционный расчеты

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
		Тепловой расчет		
		Потери в обмотках и контактах щеток		
340	$P'_{м2}$, Вт	(10-316)	$29,3^2 \cdot 1,48 \cdot 0,24 = 305$	$373,3^2 \cdot 1,48 \cdot 0,014 = 2887$
341	$P'_{м.д}$, Вт	(10-318)	$29,3^2 \cdot 1,48 \cdot 0,13 = 165$	$373,3^2 \cdot 1,48 \cdot 0,008 = 1650$
342	$P'_{м.пос}$, Вт	(10-319)	$29,3^2 \cdot 1,48 \cdot 0,018 = 23$	$373,3^2 \cdot 1,48 \cdot 0,00119 = 245$
343	$P_{м.п}$, Вт	(10-286)	$220 \cdot 1,05 = 231$	$220 \cdot 5,46 = 1201$
344	$P_{к.щ}$, Вт	(10-287)	$2 \cdot 29,3 \approx 59$	$2 \cdot 373,3 \approx 747$
		Обмотка якоря		
345	$S_{п2}$, мм²	(10-320)	$\pi \cdot 160 \cdot 155 = 0,78 \cdot 10^5$	$(\pi \cdot 290 + 21 \cdot 18)\, 300 = 3,87 \cdot 10^5$
346	$П_2$, мм	(10-321)	$(4,7+2,9) + 2 \cdot 16,6 = 57$	—
347	$П_2$, мм	(10-322)	—	$2\,(34+11,5) = 91$
348	$S_{и.п2}$, мм²	(10-323)	$29 \cdot 57 \cdot 155 = 2,56 \cdot 10^5$	$33 \cdot 91 \cdot 300 = 9 \cdot 10^5$
349	$S_{л2}$, мм²	(10-324)	$2\pi \cdot 160 \cdot 48,4 = 0,49 \cdot 10^5$	—
350	$S_{л2}$, мм²	(10-325)	—	$3\pi \cdot 290 \cdot 95 = 2,6 \cdot 10^5$
351	$S_{маш}$, мм²	(10-326)	$\pi \cdot 308\,(155 + 2 \cdot 48,4) = 2,44 \cdot 10^5$	$\pi \cdot 544\,(300 + 2 \cdot 95) = 8,36 \cdot 10^5$
352	$p_{п2}$, Вт/мм²	(10-327)	$\frac{305 \cdot 2 \cdot 155/646 + 117}{0,78 \cdot 10^5} = 338 \cdot 10^{-5}$	$\frac{2887 \cdot 2 \cdot 300/1216 + 319}{3,87 \cdot 10^5} = 451 \cdot 10^{-5}$
353	$p_{и.п2}$, Вт/мм²	(10-328)	$\frac{305 \cdot 2 \cdot 155/646}{2,56 \cdot 10^5} = 57 \cdot 10^{-5}$	$\frac{2887 \cdot 2 \cdot 300/1216}{9 \cdot 10^5} = 158 \cdot 10^{-5}$
354	$p_{л2}$, Вт/мм²	(10-329)	$\frac{305 \cdot 2 \cdot 168/646}{0,49 \cdot 10^5} = 324 \cdot 10^{-5}$	$\frac{2887 \cdot 2 \cdot 307/1216}{2,6 \cdot 10^5} = 561 \cdot 10^{-5}$
		—		

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
355	$v_{2н}$, м/с	(10-330)	$\pi\cdot 160\cdot 1500/60\,000=12,56$	$\pi\cdot 290\cdot 1000/60\,000=15,18$
356	$\Delta t_{п2}$, °C	(10-331)	$338\cdot 10^{-5}/(8,6\cdot 10^{-5})=39,3$	$451\cdot 10^{-5}/(8,6\cdot 10^{-5})=52,4$
357	$\Delta t_{и.п2}$, °C	(10-332)	$57\cdot 10^{-5}\left(\frac{0,5}{16\cdot 10^{-5}}+\frac{4,7+2,9}{8\cdot 120\cdot 10^{-5}}\right)=2,2$	$158\cdot 10^{-5}\,\frac{1,25}{16\cdot 10^{-5}}=12,3$
358	$\Delta t_{л2}$, °C	(10-333)	$324\cdot 10^{-5}/(8,6\cdot 10^{-5})=37,7$	$561\cdot 10^{-5}/(8,6\cdot 10^{-5})=65,2$
359	$\Delta t_{и.л2}$, °C	(10-334)	$324\cdot 10^{-5}\,\frac{25}{8\cdot 120\cdot 10^{-5}}=8,4$	$561\cdot 10^{-5}\,\frac{0,5}{16\cdot 10^{-5}}=17,5$
360	$\Delta t'_2$, °C	(10-335)	$(39,3+2,2)\,2\cdot 155/646+(37,7+8,4)\,2\times 168/646=43,9$	$(52,4+12,3)\,2\times 300/1216+(65,2+17,5)\,2\cdot 308/1216=73,8$
361	P'_{Σ}, Вт	(10-336)	—	$2887+0,9\,(1650+245+1201)+747+778+319+829=8346$
362	P'_{Σ}, Вт	(10-337)	$305+0,7\,(165+23+231)+59+49+0,1\times 189+117+67=909$	—
363	$\Delta t_{в}$, °C	(10-339)	$909/(10,5\cdot 10^{-5}\cdot 72,44\times 10^{5})=35,5$	$8346/(78\cdot 10^{-5}\cdot 8,5\cdot 10^{5})=12,6$
364	Δt_{2}, °C	(10-340)	$43,9+35,5=79,4$	$73,8+12,6=86,4$

Обмотка добавочных полюсов

365	$S_{д}$, мм²	(10-363)	$4\cdot 404\cdot 64,8=1,05\cdot 10^{5}$	—
366	$S_{д}$, мм²	(10-364)	—	$4\cdot 811\,(15\cdot 4,1+0,6\times 26,3)=2,5\cdot 10^{5}$
367	$p_{д}$, Вт/мм²	(10-365)	$0,7\cdot 165/(1,05\cdot 10^{5})=110\cdot 10^{-5}$	$0,9\cdot 1650/(2,5\cdot 10^{5})=594\cdot 10^{-5}$
368	$\Delta t_{н.д}$, °C	(10-366)	$110\cdot 10^{-5}/(4,55\cdot 10^{-5})=24,2$	$594\cdot 10^{-5}/(1,7\cdot 5,2\times 10^{-5})=67$
369	$\Delta t_{и.д}$, °C	(10-367)	$110\cdot 10^{-5}\cdot 0,2/(16\times 10^{-5})=1,4$	—
370	$\Delta t'_{д}$, °C	(10-368)	$24,2+1,4=25,6$	67
371	$\Delta t_{д}$, °C	(10-369)	$25,6+35,5=61,1$	$67+12,6=79,6$

Параллельная обмотка главных полюсов

372	$S_{п}$, мм²	(10-370)	$4\cdot 466\cdot 59,4=1,11\cdot 10^{5}$	$4\cdot 888\cdot 118=19\cdot 10^{5}$
373	$p_{п}$, Вт/мм²	(10-371)	$0,7\cdot 231/(1,11\cdot 10^{5})=146\cdot 10^{-5}$	$0,9\cdot 1201/(4,19\cdot 10^{5})=258\cdot 10^{-5}$
374	$\Delta t_{п.п}$, °C	(10-372)	$146\cdot 10^{-5}/(4,55\cdot 10^{-5})=32,1$	$258\cdot 10^{-5}/(5,2\cdot 10^{-5})=49,6$
375	$\Delta t_{и.п}$, °C	(10-373)	$146\cdot 10^{-5}\left(\frac{0,2}{16\cdot 10^{-5}}+\frac{19,2}{8\cdot 98\cdot 10^{-5}}\right)=5,3$	$258\cdot 10^{-5}\left(\frac{0,2}{16\cdot 10^{-5}}+\frac{34,8}{8\cdot 115\cdot 10^{-5}}\right)=13$
376	$\Delta t'_{п}$, °C	(10-374)	$32,1+5,3=37,4$	$49,6+13=62,6$
377	$\Delta t_{п}$, °C	(10-375)	$37,4+35,5=72,9$	$62,6+12,6=75,2$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
			Коллектор	
378	$S_к$, мм²	(10-376)	$\pi\cdot125\cdot51=0,2\cdot10^5$	$\pi\cdot200\cdot208=1,3\cdot10^5$
379	$p_к$, Вт/мм²	(10-377)	$(59+49)/(0,2\cdot10^5)=$ $=540\cdot10^{-5}$	$(747+503)/(1,3\cdot10^5)=$ $=962\cdot10^{-5}$
380	$\Delta t'_к$, °С	(10-378)	$540\cdot10^{-5}/(18\cdot10^{-5})=$ $=30$	$962\cdot10^{-5}/(23,3\cdot10^{-5})=$ $=41,3$
381	$\Delta t_к$, °С	(10-379)	—	41,3
382	$\Delta t_к$, °С	(10-381)	$30+35,5=65,5$	—
			Вентиляционный расчет	
383	$V_в$, м³/с	(5-42); (5-43)	$5,21\cdot1177/(1100\cdot35,5)=$ $=0,157$	—
384	$V'_в$, м³/с	(5-44)	$0,6\,(1500/1000)\times$ $\times(308/100)^3\,10^{-2}=0,263$	—
385	H, Па	(5-45)	$12,3\,(1500/1000)^2\times$ $\times\,(308/100)^2=263$	—
386	$V_в$, м³/с	(5-28)	—	$8374/(1100\cdot24,6)=0,03$
387	Z, Па·с²/м⁶	рис. 5-5	—	1500
388	$D_{вен2}$, мм	(10-382)	—	$0,9\cdot476\approx430$
389	$D_{вен1}$, мм	(10-383)	—	$0,65\cdot476\approx310$
390	$l_л$, мм	(10-384)	—	$0,13\cdot476\approx60$
391	$N_л$	(10-385)	—	$430/20\approx23$
392	$v_{вен2}$, м/с	(5-34)	—	$\pi\cdot430\cdot1000/(6\cdot10^4)=$ $=22,5$
393	$v_{вен1}$, м/с	(5-35)	—	$\pi\cdot310\cdot1000/(6\cdot10^4)=$ $=16,2$
394	H_0, Па	(5-33)	—	$0,6\cdot1,23\,(22,5^2-16,2^2)=$ $=180$
395	$S_{вен}$, м²	(5-37)	—	$0,92\pi\cdot430\cdot60\cdot10^{-6}=$ $=0,075$
396	$V_{в\,max}$, м³/с	(5-36)	—	$0,42\cdot22,5\cdot0,075=0,71$
397	$V_в$, м³/с	(5-38)	—	$0,71\sqrt{\frac{180}{180+1500\times0,71^2}}=$ $=0,31$
398	H, Па	(5-39)	—	$\frac{180\cdot1500\cdot0,71^2}{180+1500\cdot0,71^2}=145$

§ 10-17. Масса и динамические показатели

Наряду с высотой оси вращения и КПД важными технико-экономическими показателями машины постоянного тока является масса машины, а у двигателей, широко применяемых в быстродействующих регулируемых системах, также динамические пока-

затели — динамический момент инерции и электромеханическая постоянная якоря.

Масса машины и динамический момент инерции якоря могут быть вычислены по чертежам отдельных частей машины, разрабатываемых после окончания проектирования машины. Для предварительной оценки технико-экономической эффективности разработанного проекта машины целесообразно расчет массы и динамического момента инерции якоря производить по эмпирическим формулам.

Массу машины определяют в такой последовательности.

Масса проводов обмотки якоря (кг)	$m_{м2}=8{,}9w_2l_{ср2}cS\cdot10^{-6}$	(10-386)
То же, стержневой компенсационной обмотки	$m_{м1}=8{,}9\cdot2pN_1(l_{ст}S_{ст}+l_{ср.д1}S_{д1})$	(10-387)
То же, секционной компенсационной обмотки	$m_{м1}=8{,}9\cdot2pw_1l_{ср1}cS\cdot10^{-6}$	(10-388)
То же, обмотки добавочных полюсов	$m_{м.д}=8{,}9\cdot2p_дw_дl_{ср.д}S\cdot10^{-6}$	(10-389)
То же, стабилизирующей последовательной обмотки	$m_{м.пос}=8{,}9\cdot2pw_{пос}l_{ср.пос}S\cdot10^{-6}$	(10-390)
То же, параллельной или независимой обмотки главных полюсов	$m_{м.п}=8{,}9\cdot2pw_пl_{ср.п}S\cdot10^{-6}$	(10-391)
Масса меди коллектора (кг)	$m_{м.к}=5{,}25D^{1,5}{}_кl_к\cdot10^{-5}$	(10-392)
Суммарная масса проводов обмоток и меди коллектора (кг)	$m_{м\Sigma}=m_{м2}+m_{м1}+m_{м.д}+m_{м.пос}+$ $+m_{м.п}+m_{м.к}$	(10-393)
Масса стали зубцов сердечника якоря (кг)	$m_{з2}$ — по (10-262) или (10-263)	
То же, спинки сердечника якоря	$m_{с2}$ — по (10-265)	
То же, сердечников главных полюсов некомпенсированной машины	$m_п\approx8{,}5\cdot2pl_{эф.п}b_пh_п\cdot10^{-6}$	(10-394)
То же, сердечников главных полюсов компенсированной машины	$m_п\approx7{,}8\cdot2pl_{эф.п}(1{,}15b_пh_п-Z_1S_{п1})10^{-6}$	(10-395)
То же, сердечников добавочных полюсов	$m_д\approx7{,}8\cdot2p_дk_cl_дb_дh_д\cdot10^{-6}$	(10-396)
То же, массивной станины	$m_{с1}=6{,}05l_1(D^2{}_{н1}-D^2{}_1)10^{-6}$	(10-397)
То же, шихтованной станины	$m_{с1}=6{,}45k_cl_1(D^2{}_{н1}-D^2{}_1)10^{-6}$	(10-398)
Суммарная масса активной стали (кг)	$m'_{с\Sigma}=m_{з2}+m_{с2}+m_п+m_д+m_{с1}$	(10-399)
Масса изоляции машины (кг)	$m_и\approx(3{,}8D^{1,5}_{н1}+0{,}2D_{н1}l_2)10^{-4}$	(10-400)
Масса конструкционных материалов (кг)	$m_к=(AD^2{}_{н1}l_2+BD^3{}_{н1})10^{-6}$	(10-401)
Масса машины (кг)	$m_{маш}=m_{м\Sigma}+m_{с\Sigma}+m_и+m_к$	(10-402)

Здесь A и B — коэффициенты из табл. 10-17.

Таблица 10-17

Высота оси вращения, мм	Степень защиты	Способ охлаждения	Коэффициенты	
			A	B
⩽200	IP22	IC01	0,6—0,8	0,8—1,0
225—315	⩾	⩾	0,7—0,9	0,8—1,0
⩽200	IP44	IC0141	0,5—0,8	1,0—1,2
⩽200	⩾	IC0041	0,5—0,8	0,8—1,0
355—500	IP22	IC17	0,8—1,0	1,0—1,3
355—500	IP44	IC37	0,8—1,0	1,0—1,3

Динамический момент инерции якоря (кг·м²)

$$J_{и.д} \approx (0{,}55-0{,}65) D^4_{н2} (l_2 + 0{,}3D_{н2} + 0{,}75P_2) 10^{-12}, \quad (10\text{-}403)$$

Электромеханическая постоянная времени якоря (с)

$$T_м = J_{и.д} m_т r_{2\Sigma} / (91 E_2/n), \quad (10\text{-}404)$$

где E_2 и n соответствуют номинальному режиму.

Для сравнения основных показателей спроектированных машин с показателями аналогичных отечественных машин можно воспользоваться данными, приведенными в каталогах и ГОСТах. Кроме того, может быть произведена общая оценка технического уровня спроектированных машин по обобщенному показателю $Э$ (см. гл. 7).

Примеры расчета машин

16. Масса и динамические показатели

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
399	$m_{м2}$, кг	(10-386)	$8{,}9\cdot 261\cdot 646\cdot 2\cdot 1{,}539\times$ $\times 10^{-6}=4{,}62$	$8{,}9\cdot 99\cdot 1214\cdot 2\cdot 18{,}35\times$ $\times 10^{-6}=39{,}26$
400	$m_{м.д}$, кг	(10-389)	$8{,}9\cdot 4\cdot 41\cdot 404\cdot 8{,}89\times$ $\times 10^{-6}=5{,}24$	$8{,}9\cdot 4\cdot 15\cdot 811\cdot 106{,}97\times$ $\times 10^{-6}=46{,}32$
401	$m_{м.пос}$, кг	(10-390)	$8{,}9\cdot 4\cdot 5\cdot 456\cdot 8{,}89\times$ $\times 10^{-6}=0{,}72$	$8{,}9\cdot 4\cdot 2\cdot 963\cdot 106{,}97\times$ $\times 10^{-6}=7{,}33$
402	$m_{м.п}$, кг	(10-391)	$8{,}9\cdot 4\cdot 1400\cdot 466\cdot 0{,}302\times$ $\times 10^{-6}=7{,}01$	$8{,}9\cdot 4\cdot 670\cdot 888\cdot 1{,}431\times$ $\times 10^{-6}=30{,}3$
403	$m_{м.к}$, кг	(10-392)	$5{,}25\cdot 125^{1{,}5}\cdot 51\cdot 10^{-5}=$ $=3{,}75$	$5{,}25\cdot 200^{1{,}5}\cdot 208\cdot 10^{-5}=$ $=30{,}79$
404	$m_{м\Sigma}$, кг	(10-393)	$4{,}62+5{,}24+0{,}72+$ $+7{,}01+3{,}75=21{,}34$	$39{,}26+46{,}32+7{,}33+$ $+30{,}3+30{,}79=154$
405	$m_{з2}$, кг	(10-262)	4,6	—
406	$m_{з2}$, кг	(10-263)	—	32,05
407	$m_{с2}$, кг	(10-265)	8,7	60
408	$m_п$, кг	(10-394)	$8{,}5\cdot 4\cdot 151{,}9\cdot 40\cdot 53{,}8\times$ $\times 10^{-6}=11{,}1$	$8{,}5\cdot 4\cdot 294\cdot 80\cdot 87{,}6\times$ $\times 10^{-6}=70{,}55$
409	$m_д$, кг	(10-396)	$7{,}8\cdot 4\cdot 0{,}98\cdot 145\cdot 19\times$ $\times 50{,}4\cdot 10^{-6}=4{,}25$	$7{,}8\cdot 4\cdot 0{,}98\cdot 300\cdot 35\times$ $\times 82{,}2\cdot 10^{-6}=26{,}39$
410	$m_{с1}$, кг	(10-397)	$6{,}05\cdot 235\,(308^2-274^2)\times$ $\times 10^{-6}=28{,}13$	$6{,}05\cdot 450\,(544^2-476^2)\times$ $\times 10^{-6}=189$
411	$m_{с\Sigma}$, кг	(10-399)	$4{,}6+8{,}7+11{,}1+4{,}25+$ $+28{,}13=56{,}78$	$32{,}05+60+70{,}05+$ $+26{,}39+189=377{,}49$
412	$m_и$, кг	(10-400)	$(3{,}8\cdot 308^{1{,}5}+0{,}2\cdot 308\times$ $\times 155)\,10^{-4}=3{,}0$	$(3{,}8\cdot 544^{1{,}5}+0{,}2\cdot 544\times$ $\times 300)\,10^{-4}=8{,}05$
413	$m_к$, кг	(10-401)	$(0{,}7\cdot 308^2\cdot 155+1{,}1\times$ $\times 308^3)\,10^{-6}=42{,}43$	$(0{,}7\cdot 544^2\cdot 300+0{,}8\times$ $\times 544^3)\,10^{-6}=190{,}75$
414	$m_{маш}$, кг	(10-402)	$21{,}34+56{,}78+3{,}0+$ $+42{,}43=123{,}5$	$154+377{,}49+8{,}05+$ $+190{,}75=730$
415	$J_{и.д}$, кг·м²	(10-403)	$0{,}6\cdot 160^4\,(155+0{,}3\times$ $\times 160+0{,}75\cdot 5{,}5)\,10^{-12}=$ $=0{,}0814$	$0{,}65\cdot 290^4\,(300+0{,}3\times$ $\times 290+0{,}75\cdot 75)\,10^{-12}=$ $=2{,}04$
416	$T_м$, с	(10-404)	$\frac{0{,}0814\cdot 0{,}535}{91\cdot 202{,}1/1500}=0{,}00355$	$\frac{2{,}04\cdot 0{,}032}{91\cdot 206{,}1/1000}=0{,}0034$

Глава 11.
РАСЧЕТ СИНХРОННЫХ МАШИН

§ 11-1. Единые серии синхронных машин

Общие сведения. Синхронные машины применяют во многих отраслях народного хозяйства, в частности, в качестве генераторов в передвижных и стационарных электрических станциях, двигателей в установках, не требующих регулирования частоты вращения или нуждающихся в постоянной частоте вращения.

Наиболее распространена конструктивная схема синхронной машины с вращающимся ротором, на котором расположены явновыраженные полюсы. Иногда явнополюсные синхронные машины малой мощности (до 15 кВт) выполняют по конструктивной схеме машин постоянного тока, т. е. с полюсами, расположенными на статоре, коллектор заменяется контактными кольцами. Сейчас отечественная промышленность выпускает несколько общепромышленных и специальных серий синхронных машин.

Серия ЕСС. Трехфазные синхронные генераторы серии ЕСС изготовляют мощностью от 5 до 50 кВт при высоте оси вращения $h=180\div315$ мм, в защищенном исполнении IP23, с самовентиляцией IC01, с частотой вращения 1500 об/мин. Эти генераторы предназначены для продолжительного режима работы в передвижных и стационарных электроустановках и в качестве источников трехфазного переменного тока напряжением 230 и 400 В, с частотой 50 Гц, с коэффициентом мощности, равным 0,8 (при отстающем токе), в условиях умеренного или тропического климата.

Генераторы серии ЕСС выполняют явнополюсными с самовозбуждением через полупроводниковые выпрямители и снабжают аппаратурой для автоматического регулирования напряжения, которая состоит из блока регулирования напряжения, корректора и потенциометра установки. Эта аппаратура обеспечивает точность поддержания напряжения на зажимах в пределах $\pm2\%$ от среднерегулируемого значения при изменении нагрузки от нуля до номинальной величины и коэффициенте мощности в пределах от 1,0 до 0,8, при отклонении частоты вращения первичного двигателя от номинальной величины не более $\pm3\%$ и при неизменной нагрузке не более $\pm1\%$. Схема регулирования позволяет изменять установку напряжения в пределах от 100 до 95% $U_н$.

Генераторы допускают 10%-ную перегрузку по мощности в течение одного часа при номинальных значениях напряжения и коэффициента мощности; на х. х. обеспечивают пуск ненагруженного асинхронного двигателя, номинальная мощность которого не превышает 70% мощности генератора, при снижении напряжения, не превышающем 50% от номинального значения. Нагревостойкость изоляционных материалов генераторов соответствует классу В; система вентиляции — аксиальная вытяжная. Приводными двигателями генераторов серии ЕСС могут служить дизельные, карбюраторные, газогенераторные и электрические двигатели, а также локомобили. Вращение передается через упругую муфту или клиноременную передачу.

Серии СД2 и СГ2. Синхронные двигатели серии СД2 и генераторы серии СГ2 изготовляют мощностью от 132 до 1000 кВт, при высоте оси вращения до 450 мм, в защищенном исполнении IP23, с самовентиляцией IC01, с частотой вращения от 500 до до 1500 об/мин.

Двигатели используют для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (насосов, вентиляторов и др.), и изготовляют на напряжения 380 и 6000 В, при частоте 50 и 60 Гц. Генераторы предназначены для выработки трехфазного переменного тока, напряжением 400 В, частотой 50 Гц на стационарных дизель-электрических станциях.

Электрические машины серий СД2 и СГ2 рассчитаны на продолжительный режим работы. Их возбуждение осуществляется от устройства, питающегося от дополнительной обмотки, заложенной в пазы статора. Нагревостойкость изоляционных материалов соответствует классу B. Ток возбуждения регулируют изменением угла зажигания тиристоров преобразователя возбудительного устройства. Последние смонтированы в шкафах: в одном для двигателя и в двух для генератора. В шкафах размещены тиристорные преобразователи, элементы электронной системы управления, коммутационная аппаратура. Система управления двигателя осуществляет автоматическую подачу возбуждения в процессе пуска при спадании тока статора до установленной величины, а также обеспечивает форсировку возбуждения при падении напряжения в главной цепи двигателя до 80—85% номинального. Отключается форсировка при увеличении напряжения сети до 90—95% номинального значения.

Обмотка возбуждения синхронного генератора получает выпрямленный ток через тиристорный и диодный преобразователи, соединенные параллельно на стороне выпрямленного тока. Тиристорный преобразователь питается от дополнительной обмотки, заложенной в пазы статора синхронного генератора, и в номинальном режиме работы генератора несет на себе около 30% нагрузки возбуждения. Остальную часть мощности возбуждения обеспечивает диодный преобразователь, питаемый от компаундирующего трансформатора, включенного в цепь статора, который служит для поддержания напряжения генератора при изменении нагрузки и в режиме короткого замыкания. Двигатели и генераторы имеют радиальную систему вентиляции, обеспечиваемую вентиляционным действием полюсов ротора и вентиляционными лопатками. Охлаждающий воздух при этом входит через вентиляционные окна в подшипниковых щитах, проходит по лобовым частям обмотки статора, через междуполюсное пространство ротора, радиальные каналы статора и выходит через боковые жалюзи станины.

Двигатели и генераторы допускают правое и левое направление вращения. Двигатели рассчитаны на прямой пуск при номинальном напряжении сети и допускают два пуска подряд из холодного состояния и один из нагретого.

§ 11-2. Исходные данные для проектирования

Для проектирования синхронных машин должны быть заданы следующие исходные данные: 1. Назначение — генератор или двигатель. 2. Номинальный режим работы по ГОСТ 183—74. 3. Номинальная отдаваемая мощность по ГОСТ 12139—74. 4. Количество фаз статора. 5. Способ соединения фаз статора (⅄; Δ). 6. Частота напряжения. 7. Коэффициент мощности по ГОСТ 20550—75, 22407—77, ГОСТ 18200—79Е. 8. Номинальное линейное напряжение по ГОСТ 21128—75. 9. Частота вращения по ГОСТ 10683—73. 10. Способ возбуждения. 11. Степень защиты от внешних воздействий по СТ СЭВ 247—76. 12. Способ охлаждения по ГОСТ 20459—75. 13. Исполнение по способу монтажа по СТ СЭВ 246—76. 14. Климатические условия и категория размещения по ГОСТ 15150—69 и 15543—70. 15. Форма выступающего конца вала. 16. Способ соединения с приводным механизмом (для двигателей) или приводным двигателем (для генераторов).

Кроме того, дополнительно используют данные о высоте оси вращения по ГОСТ 13267—73, установочно-присоединительных размерах по ГОСТ 18709—73 или 20839—75. Содержание перечисленных предписаний стандартов приведено в § 1-2. Во всем не оговоренном в исходных данных машины должны удовлетворять требованиям ГОСТ 183—74.

Примеры расчета машин.

1. Исходные данные для проектирования

Наименование заданных параметров и их условные обозначения	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
Назначение	Генератор	Двигатель
Номинальный режим работы	Продолжительный	($S1$)
Номинальная отдаваемая мощность P_2, кВт	30	400
Количество фаз статора m_1	3	3
Способ соединения фаз статора	⅄	⅄
Частота напряжения f, Гц	50	50
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,8 (отстающий)	0,9 (опережающий)
Номинальное линейное напряжение $U_л$, В	400	6000
Частота вращения n_1, об/мин	1500	750
Способ возбуждения	От специальной обмотки, заложенной в пазы статора	
Степень защиты от внешних воздействий	IP23	IP23
Способ охлаждения	IC01	IC01
Исполнение по способу монтажа	IM1001	IM1001
Климатические условия и категория размещения	У2	У4
Форма выступающего конца вала	Цилиндрическая	
Способ соединения с приводимым механизмом или приводным двигателем	Упругая муфта	
Количество пар полюсов	2 по (9-1)	4

Дополнительные общие требования: высота оси вращения по ГОСТ 13267—73; установочно-присоединительные размеры по ГОСТ 18709—78 и ГОСТ 20839—75.

§ 11-3. Магнитная цепь машины.

Размеры, конфигурация, материал

Главные размеры. Проектирование синхронных машин начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра D_1 и длины l_1 сердечника статора.

Конструкция и метод расчета параметров статоров синхронных машин и асинхронных двигателей близки. Поэтому определение наружного диаметра $D_{н1}$ и главных размеров, а также конструктивной длины, марки стали, формы пазов и типа обмотки сердечника статора синхронных машин производится в соответствии с § 9-3. Синхронные машины малой и средней мощности общего назначения обычно выполняют со степенью защиты IP23, при способе охлаждения IC01.

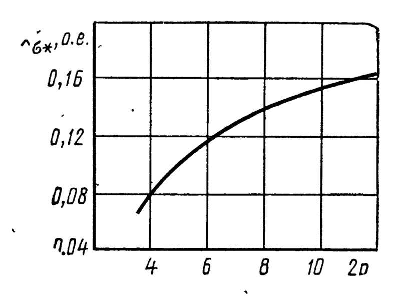


Рис. 11-1. Зависимость $x'_{\sigma*}=f(2p)$

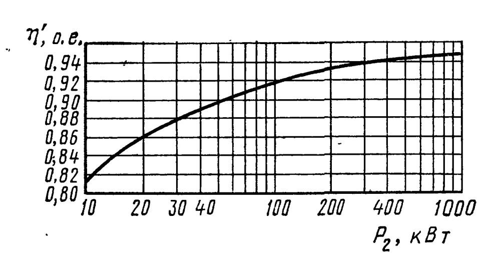


Рис. 11-2. Средние значения $\eta'=f(P_2)$

Расчетную мощность P' определяют по (1-11) для двигателей и по (1-12) для генераторов. При этом значение коэффициента $k_н=E_\delta/U_1$ (зависящего главным образом от индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора $x_{\sigma*}$ (о. е.) и коэффициента мощности нагрузки) предварительно может быть определено по формуле

$$k_н \approx \sqrt{\cos^2\varphi + (\sin\varphi + x'_{\sigma*})^2}. \qquad (11\text{-}1)$$

Предварительное значение $x'_{\sigma*}$ можно найти по рис. 11-1. Для синхронных генераторов принимают $\cos\varphi=0{,}8$ (при отстающем токе), а для двигателей $\cos\varphi=0{,}9$ (при опережающем токе).

Предварительные значения КПД η' могут быть определены по рис. 11-2*.

Если заданием на проектирование синхронной машины высота оси вращения h не регламентирована, то ее предварительно выбирают из табл. 11-1 (при исполнении IP23 со способом охлаждения IC01).

Таблица 11-1

Высота оси вращения h, мм	Мощность P_2 (кВт) при следующих частотах вращения n_1, об/мин					M_2 (Н·м) при $n_1=1500$ об/мин
	1500	1000	750	600	500	
160	4	—	—	—	—	26,7
180	5,5	—	—	—	—	36,7
	7,5	—	—	—	—	50
	11	—	—	—	—	73,5
200	15	—	—	—	—	100
	18,5	—	—	—	—	123
225	30	22	—	—	—	200
	37	30	—	—	—	247
	45	—	—	—	—	300
250	55	37	—	—	—	367
	75	45	—	—	—	500
280	90	55	—	—	—	600
	110	75	—	—	—	735
	132	90	—	—	—	880
315	160	110	75	45	—	1065
	200	132	90	55	—	1330
355	250	160	110	75	55	1670
	315	200	132	90	75	2100
400	—	—	160	110	90	—
	400	250	200	132	110	2680
	500	315	250	160	132	3330
450	630	400	315	250	200	4200
	800	500	400	315	250	5330
	1000	630	500	400	315	6660

Максимально допустимое значение наружного диаметра сердечника статора $D_{н1\,max}$ находят по табл. 9-2. Затем принимают $D_{н1} \leqslant D_{н1\,max}$. Припуски на штамповку $\Delta_{шт}$, а также ширина резаных лент и стандартной рулонной стали, из которых штампуют листы сердечника, приведены в табл. 9-2. Внутренний диаметр сердечника статора D_1 можно определить, пользуясь зависимостями $D_1 = f(D_{н1})$, приведенными ниже:

Количество полюсов $2p$	4	6; 8	10; 12
Зависимость $D_1=f(D_{н1})$, мм	$D_1=6+0,69D_{н1}$	$D_1=43+0,72D_{н1}$	$D_1=69+0,73D_{н1}$

Эти зависимости относятся в машинам, рассчитанным на линейное напряжение $U_л \leqslant 660$ В. При расчете машин на напряжение

* Здесь и далее предварительные значения параметров обозначаются знаком «штрих» для отличия от уточняемых в дальнейшем значений.

$U_л = 6000 \div 6600$ В, полученное по указанным зависимостям значение D_1 должно быть уменьшено на 4%.

При определении расчетной длины сердечника статора l'_1 синхронной машины по (1-31) предварительные значения линейной нагрузки A'_1 принимают из рис. 11-3, а магнитной индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке B'_δ — из рис. 11-4.

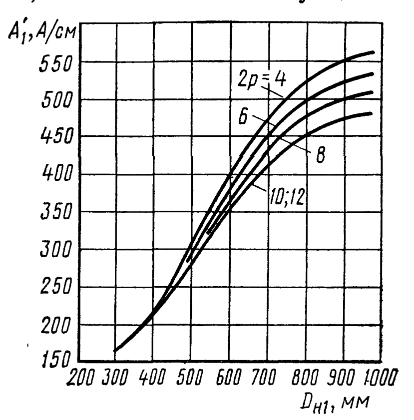


Рис. 11-3. Средние значения $A_1' = f(D_{н1})$

Данные, приведенные на рис. 11-3 и 11-4, соответствуют выполнению машин с изоляцией класса нагревостойкости F. При проектировании машины с изоляцией другого класса нагревостойкости значения A'_1, полученные из рис. 11-3, умножают на поправочный коэффициент, равный 0,86 (при классе В) или 1,14 (при классе Н). Значения B_δ при классах нагревостойкости изоляции В и Н остаются такими же, как и для класса F.

Расчетный коэффициент полюсной дуги α', входящий в (1-31), зависит от ряда параметров, в том числе от воздушного зазора δ между статором и полюсными наконечниками. Этот зазор в значительной мере определяет технико-экономические показатели и характеристики синхронной машины. От значения δ зависит синхронное индуктивное сопро-

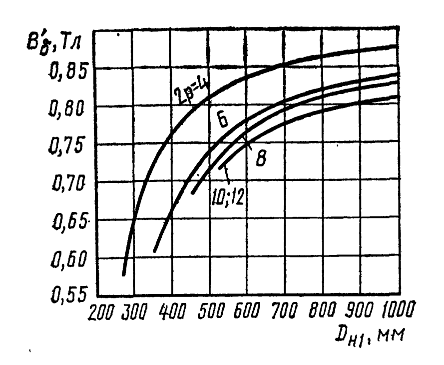


Рис. 11-4. Средние значения $B_\delta = f(D_{н1})$

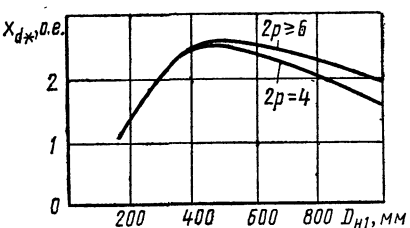


Рис. 11-5. Средние значения $x_{d*} = f(D_{н1})$

тивление машины по продольной оси x_d, которое влияет на величины максимального вращающего момента M_{max} и установившегося тока короткого замыкания $I_к$; с уменьшением δ увеличивается x_d и уменьшается M_{max} и $I_х$. В современных синхронных машинах x_{d*} меняется в широких пределах.

Машины с повышенной перегрузочной способностью имеют больший зазор и $x_{d*} < 1,0$; при этом они более материалоемки, что связано прежде всего с заметным увеличением размеров обмотки

возбуждения полюсов и всей машины. Ориентировочно значение x_{d*} можно определить из рис. 11-5.

Для уменьшения влияния реакции якоря воздушный зазор между полюсным наконечником и сердечником статора синхронных машин делают значительно большим, чем в асинхронных. Воздушный зазор (мм)

$$\delta = 36 \cdot 10^{-6} \tau A'_1 / (x_{ad*} B'_{\delta 0} k'). \qquad (11\text{-}2)$$

Здесь τ — полюсное деление сердечника статора, мм; x_{ad*} — индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси, о. е.; $B'_{\delta 0}$ — предварительное максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре машины при х.х. и номинальном напряжении, Тл; k' — коэффициент, учитывающий наличие зазоров в стыке полюса и сердечника ротора или полюсного наконечника и полюса. Обычно $k' = 1{,}04 \div 1{,}08$, меньшие значения k' относятся к машинам большей мощности. Полученное по (11-2) значение δ округляют до ближайшего числа, кратного 0,1 мм.

Диаметр сердечника статора и значение воздушного зазора синхронных машин определяют в такой последовательности.

Количество пар полюсов	p — по (9-1)	
Предварительное значение индуктивного сопротивления рассеяния (о. е.)	$x'_{\sigma *}$ — по рис. 11-1	
Коэффициент $k_н$	$k_н$ — по (11-1)	
Предварительное значение КПД	η' — по рис. 11-2	
Расчетная мощность двигателя (кВт)	P' — по (1-11)	
То же, генератора	P' — по (1-12)	
Высота оси вращения (мм)	h — по табл. 11-1	
Допустимое расстояние от корпуса до опорной поверхности (мм)	h_1 — по рис. 1-1 и табл. 9-2	
Наружный диаметр корпуса (мм)	$D_{корп}$ — по (1-27)	
Максимально допустимый наружный диаметр сердечника статора (мм)	$D_{н1 max}$ — по табл. 9-2	
Выбираемый наружный диаметр сердечника статора (мм)	$D_{н1}$ — из § 11-3	
Внутренний диаметр сердечника статора (мм)	D_1 — из § 11-3	
Предварительное значение линейной нагрузки статора (А/см)	A'_1 — из рис. 11-3	
Предварительное значение магнитной индукции в воздушом зазоре в номинальном режиме (Тл)	B'_δ — из рис. 11-4	
Предварительное значение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре машины при х. х. (Тл)	$B'_{\delta 0} = B'_\delta / k_н$	(11-3)
Полюсное деление статора (мм)	τ — по (1-5)	
Индуктивное сопротивление машины по продольной оси (о. е)	x_{d*} — по рис. 11-5	
Индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси (о. е.)	$x_{ad} = x_{d*} - x_{\sigma *}$	(11-4)

Коэффициент, учитывающий наличие зазоров в стыке полюса и сердечника ротора или полюсного наконечника и полюса	k' — по § 11-3
Расчетная величина воздушного зазора между полюсным наконечником и сердечником статора (мм)	δ — по (11-2)

Для того чтобы форма поля возбуждения в воздушном зазоре между полюсным наконечником и сердечником статора приближалась к синусоиде, полюсным наконечникам придают определенную форму.

В синхронных машинах с $h=160\div280$ мм для получения необходимой формы поля целесообразно применение гребенчатой конструкции полюсных наконечников (рис. 11-6) с равномерным воздушным зазором 0,7—2,0 мм.

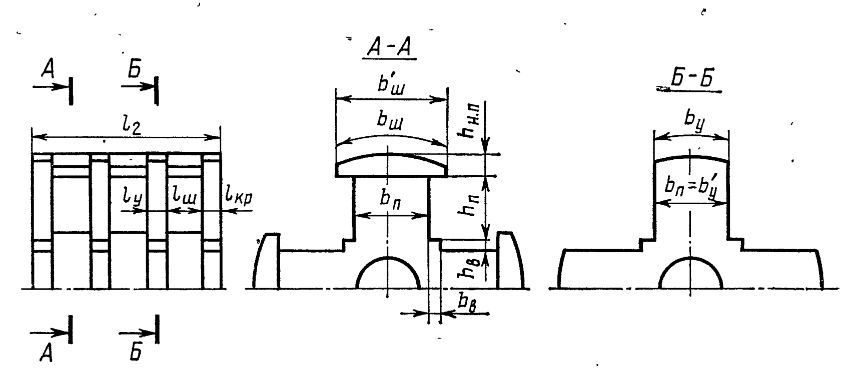


Рис. 11-6. Ротор с гребенчатой конструкцией полюсных наконечников

Соотношение между длинами чередующихся вдоль оси ротора пакетов сердечника полюса с узкими, $l_у$ и широкими $l_ш$ полюсными наконечниками (рис. 11-6) целесообразно принимать таким, чтобы суммарная длина пакетов с широкими полюсными наконечниками $l_{ш\Sigma}$ составляла около 70% полной длины полюса $l_п$, т.е. $l_{ш\Sigma}/l_п\approx0{,}7$ и $l_{у\Sigma}/l_п\approx0{,}3$; $l_ш=20\div30$ мм, $l_у\approx0{,}3l_ш$.

Коэффициент полюсной дуги для пакетов с широкими полюсными наконечниками $\alpha_ш\approx0{,}77$, для пакетов с узкими полюсными наконечниками (включая крайние, ширина которых принимается равной ширине $b_п$ сердечника полюса) $\alpha_у\approx0{,}35\div0{,}4$.

При выборе соотношения между широкими $b_ш$ и узкими $b_у$ полюсными наконечниками следует руководствоваться зависимостью $b'_у/b'_ш=f(\tau)$, приведенной на рис. 11-7.

В машинах с $h=315\div450$ мм применяют эксцентричный воздушный зазор, при котором центры радиусов полюсной дуги и внутренней окружности сердечника статора не совпадают (рис. 11-8); в этом случае зазор имеет наимеьшее значение δ' под

серединой полюса, постепенно увеличивающееся до δ'' к краям полюсного наконечника. Для рассматриваемых машин обычно принимают $\delta''=1,5\delta'$; расчетный (эквивалентный) воздушный зазор в этом случае $\delta=0,75\delta'+0,25\delta''$. Коэффициент полюсной дуги

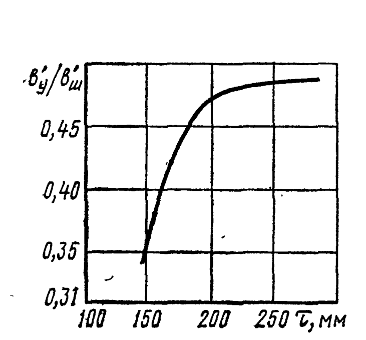


Рис. 11-7. Средние значения $b_у'/b_ш'=f(\tau)$

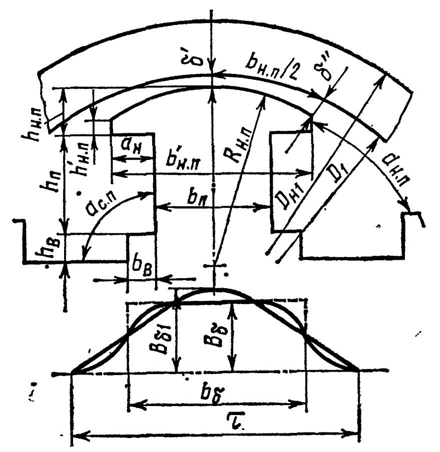


Рис. 11-8. Полюс с эксцентричным воздушным зазором

α в зависимости от количества полюсов и наружного диаметра статора приведен ниже:

Количество полюсов $2p$	4	6; 8	10; 12
Зависимость $\alpha=f(D_{н1})$, о. е.	$\alpha=0,72-8,57\times 10^{-5}D_{н1}$	$\alpha=0,73-3,33\times 10^{-5}D_{н1}$	$\alpha=0,74-1,57\times 10^{-5}D_{н1}$

Для определения расчетного коэффициента полюсной дуги α' (представляющего собой отношение расчетной полюсной дуги b'_δ к полюсному делению τ) значение b'_δ может быть найдено по кривой распределения магнитной индукции в воздушном зазоре вдоль окружности сердечника статора, что представляет собой весьма трудоемкую задачу. При гребенчатой конструкции и принятых соотношениях между $l_ш$ и $l_у$ полюсных наконечников можно принять

$$\alpha'=0,65+(2,8\delta/\tau)/(1+3,4\delta/\tau)+ \\ +(1,2\delta/\tau)/(1+4,4\delta/\tau). \quad (11\text{-}5)$$

Упрощенно значение α' при традиционной конструкции полюсных наконечников можно определить по рис. 11-9.

При выборе формы пазов и типа обмотки статоров синхронных машин можно руководствоваться табл. 9-4. При использовании двухслойной обмотки с укороченным шагом ($y\approx 0,83\tau$) обмоточный коэффициент $k_{об}=0,91$.

Расчетную длину сердечника статора l'_1 определяют по (1-31) с соответствующим округлением. Конструктивную длину сердеч-

ника статора l_1 при отсутствии в нем радиальных вентиляционных каналов принимают равной расчетной длине l'_1.

Сердечники статора длиной более 300—350 мм собирают из отдельных пакетов с радиальными вентиляционными каналами между ними. В этом случае l_1 вычисляют по (1-33). Количество вентиляционных каналов $n_к$ определяется длиной одного пакета сердечника статора $l_{п1}$, выбираемой в пределах 55—75 мм; длину вентиляционного канала $l_{к1}$ принимают равной 10 мм.

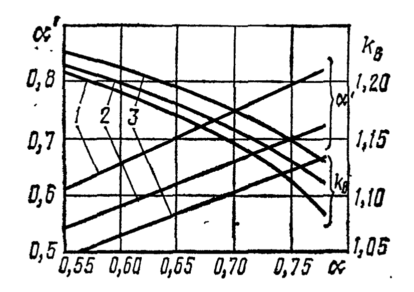


Рис. 11-9. Средние значения $k_в$ и $\alpha'=f(\alpha)$:
1 — при $\delta''/\delta'=1$; 2 — при $\delta''/\delta'=1,5$; 3 — при $\delta''/\delta'=2$

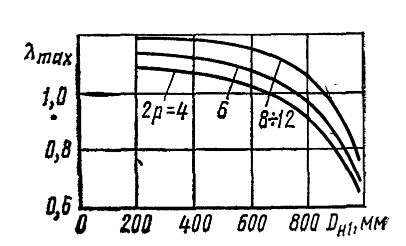


Рис. 11-10. Наибольшие значения $\lambda_{max}=f(D_{н1})$

При определении главных размеров следует исходить также из соотношения $l_1/D_1=\lambda$. Необходимо, чтобы λ не превышало предельно допускаемого значения λ_{max}, приведенного на рис. 11-10.

Основные размеры магнитной цепи рассчитывают в такой последовательности.

Машина с гребенчатой конструкцией полюсных наконечников (см. рис. 11-6).

Коэффициент полюсной дуги для пакетов с широкими полюсными наконечниками	$\alpha_ш$ — по § 11-3	
Радиус очертания полюсного наконечника (мм)	$R_{н.п}=0,5D_1-\delta$	(11-6)
Действительная ширина полюсной дуги в сечении пакета с широкими полюсными наконечниками (мм)	$b_ш=\alpha_ш\tau$	(11-7)
Ширина полюсного наконечника, определяемая хордой в сечении пакета с широкими полюсными наконечниками (мм)	$b'_ш=2R_{н.п}\sin(0,5b_ш/R_{н.п})$	(11-8)
Отношение $b'_у/b'_ш$	по рис. 11-7	
Ширина полюсного наконечника, определяемая хордой в сечении пакета с узкими полюсными наконечниками (мм)	$b'_у=b'_ш(b_у/b_ш)$	(11-9)
Действительная ширина полюсной дуги в сечении пакета с узкими полюсными наконечниками (мм)	$b_у=2R_{н.п}\sin(0,5b'_у/R_{н.п})$	(11-10)

Действительный коэффициент полюсной дуги для пакетов с узкими полюсными наконечниками	$\alpha_у = b_у/\tau$	(11-11)
Отношения $l_{ш\Sigma}/l_п$ и $l_{у\Sigma}/l_п$	по § 11-3	
Коэффициент полюсной дуги: средний	$\alpha = \alpha_ш(l_{ш\Sigma}/l_п) + \alpha_у(l_{у\Sigma}/l_п)$	(11-12)
расчетный	α' по (11-5)	

Машина с эксцентричным воздушным зазором (по рис. 11-8)

Отношение максимальной величины зазора к минимальной	δ''/δ' — по § 11-3	
Воздушный зазор по оси полюса (мм)	$\delta' = \delta/1{,}125$	(11-13)
То же, под краем полюсного наконечника	$\delta'' = \delta/0{,}75$	(11-14)
Коэффициент полюсной дуги: действительный	α — по § 11-3	
расчетный	α' — по рис. 11-9	

Сердечник статора синхронных машин. Сердечник собирают из отдельных отштампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, имеющих изоляционное покрытие для уменьшения потерь от вихревых токов.

Толщина и марка электротехнической стали, применяемой для сердечника статора, виды изоляционных покрытий, а также форма пазов статора соответствуют указаниям § 9-3.

Количество зубцов статора z_1 и зубцовое деление t_1 (мм) связаны соотношением (9-22). Важным показателем при этом является количество зубцов статора, приходящееся на полюс и фазу q_1, определяемое по (9-4).

Машины с $h = 160 \div 280$ мм выполняют с дробным значением q_1, а с $h = 315 \div 450$ мм как с целым, так и с дробным значением q_1. Для статоров многополюсных ($2p \geqslant 4$) синхронных машин (при $q_1 < 3$) обычно выбирают дробное значение q_1. Если при этом представить q_1 в виде смешанного числа или обыкновенной дроби $q_1 = b + c/d$, где c/d — несократимая дробь, то должно соблюдаться условие: $2p/d = K$, где K — целое число, а $d \neq 3K$, т. е. не должно быть кратно числу фаз.

Количество зубцов статора z_1 определяют по (9-3). Для получения симметричной двухслойной обмотки должно соблюдаться условие

$$z_1/(gm_1) = K, \tag{11-15}$$

где K — целое число; g — общий наибольший делитель чисел z_1 и p; m_1 — количество фаз.

Рекомендуемые значения q_1 приведены ниже:

h, мм	160—180		200—225		250—280		315—450				
$2p$	4	6	4	6	4	6	4	6	8	10	12
q_1	2,25	1,5	3,5	2,5	4,5	3	5	4	3	3	2,5

Сердечник статора рассчитывают в такой последовательности.

Марка, толщина (мм) и изолировка листов стали	по § 9-3	
Коэффициент заполнения сердечника статора сталью	k_c — по § 9-3	
Коэффициент формы поля возбуждения	$k_в$ — по рис. 11-9	
Обмоточный коэффициент	$k_{об1}$ — по § 9-3	
Расчетная длина сердечника статора (с соответствующим округлением), мм	l'_1 — по (1-31)	
Количество пакетов стали в сердечнике статора	$n_{п1}=l'_1/l_{п1}$	(11-16)
Длина пакета стали, мм	$l_{п1}$ — по § 11-3	
Количество радиальных вентиляционных каналов сердечника статора	$n_{к1}=n_{п1}-1$	(11-17)
Конструктивная длина сердечника статора (мм)	l_1 — по (1-33), $l_{к1}$ — по § 9-3	
Отношение конструктивной длины к внутреннему диаметру сердечника статора	λ — по (9-2)	
Проверка по условию $\lambda<\lambda_{max}$	λ_{max} — по рис. 11-10	
Количество пазов на полюс и фазу	q_1 по § 11-3	
Количество пазов сердечника статора	z_1 — по (9-3)	
Проверка правильности выбора значения z_1	z_1 — по (11-15)	

Сердечники ротора и полюсов. Для генераторов с концентричным воздушным зазором и гребенчатой конструкцией полюсных наконечников суммарную длину покетов с широкими полюсными наконечниками $l'_{ш\Sigma}$, предварительно определяют по принятому соотношению $l_{ш\Sigma}/l_п$ (мм)

$$l'_{ш\Sigma}=l_п(l_{ш\Sigma}/l_п). \qquad (11\text{-}18)$$

В таких машинах около 70% листов полюсных наконечников выполняют из тонколистовой электротехнической стали без изоляционного покрытия. Остальные собирают из листов углеродистой стали (например, У8А) толщиной 0,35—0,5 мм, также без изоляционного покрытия. Для повышения остаточной намагниченности эти листы подвергают термообработке; этим обеспечивают начальное самовозбуждение генератора без дополнительных устройств. Сердечник ротора набирают из штампованных вместе с полюсами листов электротехнической стали той же марки, которая применена в сердечнике статора, но без изоляционного покрытия и насаживают непосредственно на вал. Коэффициент заполнения стали k_c можно считать равным 0,97.

В синхронных машинах с $h=315\div450$ мм, выполняемых с эксцентричным воздушным зазором под полюсными наконечниками, полюса изготовляют из листов стали марки Ст3 толщиной 1—2 мм без изоляционного покрытия и крепят к остову (сердечнику ротора) с помощью выступов Т-образной формы, или в виде ласточкиного хвоста. Сердечники роторов собирают из штампованных многогранных стальных листов той же марки толщиной 1—2 мм без

изоляционного покрытия (число граней сердечника соответствует числу полюсов). В этом случае принимают $k_c=0,98$. Остовы (сердечники) роторов четырехполюсных синхронных машин с $h=315\div450$ мм обычно изготовляют из поковок вместе с валом.

Длину шихтованного сердечника полюса (мм) принимают

$$l_п=l_1+(10\div15). \quad (11\text{-}19)$$

Крайние пакеты гребенчатого сердечника выполняют с узкими полюсными наконечниками. Их длину $l_{кр}=(l_п-l_{ш\Sigma}-n_у l_у)/2$ принимают равной $l_у$ или несколько больше. Длина одного пакета с широким полюсным наконечником $l_ш=l_{ш\Sigma}/n_ш$, а с узким $l_у\approx\approx(l_п-l_{ш\Sigma})/(n_у+n_{кр})$. Здесь $n_ш$, $n_у$, $n_{кр}$ — количество пакетов сердечника полюса соответственно с широкими, узкими и крайними полюсными наконечниками.

В машинах с $h\leqslant280$ мм длину сердечника ротора по оси принимают равной длине сердечника полюса, т. е. $l_2=l_п$, а при $h=315\div450$ мм:

$$l_2=l_1+(10\div20). \quad (11\text{-}20)$$

Предварительное значение магнитного потока в номинальном режиме Φ' (Вб) определяют по (9-14).

Ширина сердечника полюса (мм)

$$b_п=\sigma'\Phi'\cdot10^6/(k_c l_п B'_п). \quad (11\text{-}21)$$

Здесь магнитная индукция в основании сердечника полюса $B'_п=1,4\div1,6$ Тл.

Предварительное значение коэффициента магнитного рассеяния полюсов

$$\sigma'\approx1+k_\sigma 35\delta/\tau^2. \quad (11\text{-}22)$$

Поправочный коэффициент k_σ зависит от высоты полюсного наконечника $h_{н.п}$ [см. (11-29)] и расчетного коэффициента полюсной дуги α'. При $\alpha'\geqslant0,7$

$$k_\sigma=1,3h_{н.п}+30, \quad (11\text{-}23)$$

при $\alpha'<0,7$

$$k_\sigma=1,25h_{н.п}+25. \quad (11\text{-}24)$$

Ширина дуги полюсного наконечника (мм)

$$b_{н.п}=\alpha\tau. \quad (11\text{-}25)$$

Радиус очертания полюсного наконечника при эксцентричном воздушном зазоре (мм)

$$R_{н.п}=D_1/[2+8D_1(\delta''-\delta')/b^2_{н.п}]; \quad (11\text{-}26)$$

то же, при концентричном воздушном зазоре

$$R_{н.п}=0,5D_1-\delta. \quad (11\text{-}27)$$

Ширина полюсного наконечника (мм), определяемая хордой,

$$b'_{н.п}=2R_{н.п}\sin[0,5b_{н.п}/(R_{н.п})]. \quad (11\text{-}28)$$

Высота полюсного наконечника по оси полюса для машин с эксцентричным зазором (рис. 11-8) (мм)

$$h_{н.п} = h'_{н.п} + R_{н.п} - \sqrt{R_{н.п}^2 - (0{,}5b'_{н.п})^2}. \qquad (11\text{-}29)$$

При определении $h_{н.п}$ для синхронных машин с гребенчатой конструкцией полюсных наконечников (рис. 11-6) в (11-29) вместо $b'_{н.п}$ следует подставить $b'_{ш}$.

Высота полюсного наконечника у его края $h'_{н.п} = 3 \div 20$ мм (выбирается по конструктивным соображениям); при этом следует иметь в виду, что с ростом $h_{н.п}$ возрастают рассеяние полюсов и переходное индуктивное сопротивление x'_d, а это приводит к ухудшению динамической устойчивости и удорожанию машины.

Для машин с $h = 160 \div 280$ мм и $2p = 4$ предварительная высота полюсного сердечника (мм)

$$h'_{п} \approx 0{,}5D_1 - (h_{н.п} + \delta + h_{в} + 0{,}5b_{п}). \qquad (11\text{-}30)$$

Здесь высота и ширина выступа у основания полюсного сердечника (рис. 11-6) (мм)

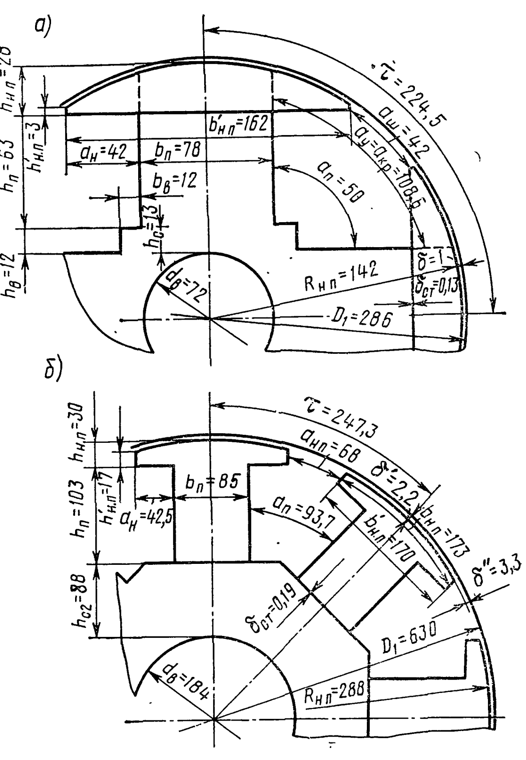


Рис. 11-11. Эскизы роторов к примерам расчета:
а — генератора; *б* — двигателя

$$h_{в} = b_{в} = 0{,}125b_{п} + 2. \qquad (11\text{-}31)$$

Для машин с $h = 315 \div 450$ мм (рис. 11-8)

$$h'_{п} = 10{,}5\delta' + 0{,}18D_1. \qquad (11\text{-}32)$$

Размер $h'_{п}$ уточняют после расчета обмотки возбуждения и вычерчивания эскиза расположения катушек возбуждения в междуполюсном окне.

Предварительно внутренний диаметр сердечника ротора (мм)

$$D'_2 = d_{в} = k_{в}\sqrt[3]{P_2/n_1}. \qquad (11\text{-}33)$$

Здесь P_2 — номинальная мощность, Вт; n_1 — частота вращения, об/мин.

Коэффициент $k_в$ определяют в зависимости от D_1:

D_1, мм	150	200	250	300	350	400	450	500	650
$k_в$, о. е.	32	30	28,3	27	26	25	24,5	24	22,6

После расчета вала на жесткость уточняют размер D'_2. Конструкция сердечника ротора и размеры его поперечного сечения в большинстве случаев определяются требованиями к его механической прочности, поэтому магнитная индукция в спинке ротора B_{c2} часто получается малой. В тихоходных машинах ($2p \geqslant 8$) сечение обода проверяется по допустимой индукции $B_{c2} \leqslant 1{,}3$ Тл.

Высота спинки ротора (мм)

$$h_{c2} = 0{,}5D_1 - \delta - h'_п - h_{н.п} - 0{,}5D'_2. \quad (11\text{-}34)$$

Расчетная высота спинки ротора с учетом прохождения части магнитного потока по валу (мм)

$$h'_{c2} = h_{c2} + 0{,}5D'_2. \quad (11\text{-}35)$$

Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)

$$B_{c2} = \Phi' \cdot 10^6 / (2h'_{c2} l_1 k_c). \quad (11\text{-}36)$$

Эскизы роторов рассчитываемых синхронных машин приведены в качестве примера на рис. 11-11,*а*, *б*.

Примеры расчета машин

2. Магнитная цепь машин. Размеры, конфигурация, материалы

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
		Принимаем изоляцию класса нагревостойкости F		
1	p	(9-1)	$60 \cdot 50/1500 = 2$	$60 \cdot 50/750 = 4$
2	$x'_{\sigma*}$, о. е.	рис. 11-1	0,08	0,14
3	$k_н$	(11-1)	$\sqrt{0{,}8^2 + (0{,}6 + 0{,}08)^2} = 1{,}05$	$\sqrt{0{,}9^2 + (0{,}44 + 0{,}14)^2} = 1{,}07$
4	η', о. е.	рис. 11-2	0,88	0,94
		Главные размеры		
5	P', кВ·А	(1-11)	—	$\frac{1{,}07 \cdot 400}{0{,}94 \cdot 0{,}9} = 506$
6	P', кВ·А	(1-12)	$1{,}05 \cdot 30/0{,}8 = 39{,}4$	—
7	h, мм	табл. 11-1	225	450
8	h_1, мм	табл. 9-2	7	9
9	$D_{корп}$, мм	(1-27)	$2(225 - 7) = 436$	$2(450 - 9) = 882$
10	$D_{н1\,max}$, мм	табл. 9-2	406	850
11	$D_{н1}$, мм	§ 11-3	406	850

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
12	D'_1, мм	§ 11-3	$6+0,69\cdot 406=286$	$43+0,72\cdot 850=655$
13	D_1, мм	§ 11-3	286	$655\cdot 0,96\approx 630$
14	A'_1, А/см	рис. 11-3	220	480
15	B'_δ, Тл	рис. 11-4	0,77	0,82
16	$B'_{\delta 0}$, Тл	(11-3)	$0,77/1,05=0,73$	$0,82/1,07=0,77$
17	τ, мм	(1-5)	$3,14\cdot 286/4=224,5$	$3,14\cdot 630/8=247,3$
18	x_{d*}, о. е.	рис. 11-5	2,5	2,2
19	x_{ad*}, о. е.	(11-4)	$2,5-0,08=2,42$	$2,2-0,14=2,06$
20	k', о. е.	§ 11-3	1,07	1,05
21	δ, мм	(11-2)	$36\cdot 10^{-6}\times \times\frac{224,5\cdot 220}{2,42\cdot 0,73\cdot 1,07}=$ $=0,94$	$36\cdot 10^{-6}\times \times\frac{247,3\cdot 480}{2,06\cdot 0,77\cdot 1,05}=2,56$
22	δ, мм	§ 11-3	1,0	2,5
23	Форма зазора	§ 11-3	Концентричная по рис. 11-6	—
24	δ''/δ'	§ 11-3	1,0	—
25	$\alpha_ш$	§ 11-3	0,77	—
26	$R_{н.п}$, мм	(11-6)	$0,5\cdot 286-1=142$	—
27	$b_ш$, мм	(11-7)	$0,77\cdot 224,5=173$	—
28	$b'_ш$, мм	(11-8)	$2\cdot 142\sin[173/(2\times \times 142)]=162$	—
29	$b_у/b_ш$	рис .11-7	0,48	—
30	$b'_у$, мм	(11-9)	$162\cdot 0,48=78$	—
31	$b_у$, мм	(11-10)	$2\cdot 142\cdot\sin(0,5\times \times 78/142)=79$	—
32	$\alpha_у$	(11-11)	$79/224,5=0,35$	—
33	$l_{ш\Sigma}/l_п$	§ 11-3	0,7	—
34	$l_{\Sigma у}/l_п$	§ 11-3	0,3	—
35	α	(11-12)	$0,77\cdot 0,7+0,35\cdot 0,3= =0,65$	—
36	α'	(11-5)	$0,65+ +\frac{2,8\cdot 1/224,5}{1+3,4\cdot 1/224,5}+ +\frac{1,2\cdot 1/224,5}{1+4,4\cdot 1/224,5}= =0,66$	

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
37	Форма зазора	§ 11-3	—	Эксцентричная по рис. 11-8
38	δ''/δ'	§ 11-3	—	1,5
39	δ', мм	(11-13)	—	$2{,}5/1{,}125 = 2{,}2$
40	δ'', мм	(11-14)	—	$2{,}5/0{,}75 = 3{,}3$
41	α	§ 11-3	—	$0{,}73 - 3{,}33\cdot 10^{-5}\cdot 850 = 0{,}7$
42	α'	рис. 11-9	—	0,66

Сердечник статора

43	Марка стали, изолировка листов	§ 9-3	2013, оксидирование	2312, лакировка
44	Толщина стали, мм	§ 9-3	0,5	0,5
45	$k_с$	§ 9-3	0,97	0,95
46	$k_в$	рис. 11-9	1,17	1,15
47	$k_{об1}$	§ 11-3	0,91	0,91
48	l'_1 мм	(1-31)	$\frac{6{,}1\cdot 10^7\cdot 39{,}4\cdot 10^3}{286^2\cdot 1500\cdot 220\cdot 0{,}77}\times \frac{1}{0{,}66\cdot 1{,}17\cdot 0{,}91} = 162$	$\frac{6{,}1\cdot 10^7\cdot 506\cdot 10^3}{630^2\cdot 750\cdot 480\cdot 0{,}82}\times \frac{1}{0{,}66\cdot 1{,}15\cdot 0{,}91} = 383$
49	l'_1, мм	§ 11-3	160	385
50	$l_{п1}$, мм	§ 11-3	—	55
51	$n_{п1}$	(11-16)	1	$385/55 = 7$
52	$l_{к1}$, мм	§ 11-3	—	10
53	$n_{к1}$	(11-17)	—	$7 - 1 = 6$
54	l_1, мм	(1-33)	160	$385 + 6\cdot 10 = 445$
55	λ	(9-2)	$160/286 = 0{,}56$	$445/630 = 0{,}71$
56	λ_{max}	рис. 11-10	$1{,}07 > 0{,}56$	$1{,}02 > 0{,}71$
57	q_1	§ 11-3	3,5	3
58	z_1	(9-3)	$2\cdot 2\cdot 3\cdot 3{,}5 = 42$	$2\cdot 4\cdot 3\cdot 3 = 72$
59	Проверка z_1	(11-15)	$42/(2\cdot 3) = 7 =$ ц. ч.	$72/(4\cdot 3) = 6 =$ ц. ч.

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
			Сердечник ротора	
60	Марка стали	§ 9-3, 11-3	2013	Ст. 3
61	Толщина листов	§ 11-3	0,5	1,5
62	Изолировка листов	§ 11-3	Без изоляции	Без изоляции
63	k_c	§ 11-3	0,97	0,98
64	l_2, мм	(11-20)	$160+10=170$	$445+15=460$
			Сердечник полюса и полюсный наконечник	
65	Марка стали	§ 11-3	2013; У8А	Ст 3
66	Толщина листов, мм	§ 11-3	0,5	1,5
67	Изолировка листов	§ 11-3	Без изоляции	Без изоляции
68	k_c	§ 11-3	0,97	0,98
69	$l_п$, мм	(11-19)	$160+10=170$	$445+15=460$
70	$l_{ш\Sigma}/l_п$	§ 11-3	0,7	—
71	$l_{ш\Sigma}$, мм	(11-18)	$170\cdot 0,7=120$	—
72	$n_ш$	§ 11-3	5	—
73	$n_у$	§ 11-3, рис. 11-6	4	—
74	$n_{кр}$	§ 11-3	2	—
75	$l_ш$, мм	§ 11-3	$120/5=24$	—
76	$l_у$, мм	§ 11-3	$(170-120)/(4+2)=8$	—
77	$l_{кр}$, мм	§ 11-3	$(170-120-4\cdot 8)/2=9$	—
78	$B'_п$, Тл	§ 11-3	1,45	1,45
79	Φ', Вб	(9-14)	$\frac{0,77\cdot 286\cdot 160\cdot 10^{-6}}{2}=$ $=17,6\cdot 10^{-3}$	$\frac{0,82\cdot 630\cdot 385\cdot 10^{-6}}{4}=$ $=49,7\cdot 10^{-3}$
80	$b_{н.п}$, мм	(11-25)	$0,77\cdot 224,5=173$	$0,7\cdot 247,3=173$
81	$R_{н.п}$, мм	(11-26),	—	$630\Big/\left[2+\frac{8\cdot 630\,(3,3-2,2)}{173^2}\right]=$ $=288$
82	$R_{н.п}$, мм	(11-27)	$0,5\cdot 286-1,0=142$	—
83	$b_{н.п}$, мм	(11-28)	—	$2\cdot 288\sin(0,5\cdot 173/288)=$ $=170$

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
84	$h'_{н.п}$, мм	§ 11-3	3	17
85	$h_{н.п}$, мм	(11-29)	$3+142-\sqrt{142^2-(0,5\cdot162)^2}=28$	$17+288-\sqrt{288^2-(0,5\cdot170)^2}=30$
86	k_σ	(11-24)	$1,25\cdot28+25=60$	$1,25\cdot30+25=62,6$
87	σ', о. е.	(11-22)	$1+60\cdot\frac{35\cdot1,0}{224,5^2}=1,04$	$1+62,5\frac{35\cdot2,5}{247,3^2}=1,09$
88	$b_п$, мм	(11-21)	$\frac{1,04\cdot17,6\cdot10^{-3}\cdot10^6}{0,97\cdot170\cdot1,45}=78$	$\frac{1,09\cdot49,7\cdot10^{-3}\cdot10^6}{0,98\cdot460\cdot1,45}=85$
89	$h_в$, мм	(11-31)	$0,125\cdot78+2=12$	—
90	$h'_п$, мм	(11-30)	$0,5\cdot286-(28+1+12+0,5\cdot78)=63$	—
91	$h'_п$, мм	(11-32)	—	$10,5\cdot2,2+0,18\cdot630=103$
92	D'_2 мм	(11-33)	$27\sqrt[3]{30\cdot10^3/1500}=72$	$22,7\sqrt[3]{400\cdot10^3/750}=184$
93	$h_{с2}$, мм	(11-34)	$0,5\cdot286-1-63-28-0,5\cdot72=13$	$0,5\cdot630-2,5-103-30-0,5\cdot184=88$
94	$h'_{с2}$, мм	(11-35)	$13+0,5\cdot72=49$	$88+0,5\cdot184=180$
95	$B_{с2}$, Тл	(11-36)	$\frac{17,6\cdot10^{-3}\cdot10^6}{2\cdot49\cdot170\cdot0,97}=1,09$	$\frac{49,7\cdot10^{-3}\cdot10^6}{2\cdot180\cdot445\cdot0,98}=0,32$

§ 11-4. Обмотка статора

Типы обмоток и общие положения. Статорные обмотки синхронных машин обычно выполняют шестизонными петлевыми двухслойными из мягких секций или из жестких катушек. При выборе типа обмоток и формы пазов статора синхронных машин с различными высотами оси вращения следует руководствоваться рекомендациями § 9-4 и в частности табл. 9-4. При этом укорочение шага обмотки статора по пазам

$$\beta_1=2p\,y_{п1}/z_1. \tag{11-37}$$

В синхронных машинах с h=160÷450 мм широко распространена система возбуждения полюсов от дополнительных обмоток, закладываемых в пазы статора с тем же шагом, что и основная обмотка; иногда в машинах с $h\leqslant280$ мм шаг дополнительной обмотки устанавливают, исходя из условия использования третьей гармоники поля. Дополнительную обмотку обычно выполняют трехфазной, однослойной из того же провода, что и основную. В машинах с h=315÷450 мм ее укладывают на дно паза, а в машинах с $h\leqslant280$ мм — сверху, под клином, после укладки основной обмотки. Вместе с изоляцией дополнительная обмотка занимает до 20% объема паза. Параметры дополнительной обмотки выби-

рают, исходя из условия обеспечения не менее 30% номинальной нагрузки цепи возбуждения (остальная часть нагрузки цепи возбуждения покрывается за счет основной обмотки). Для синхронных машин с $h \leqslant 450$ мм номинальное напряжение цепи возбуждения $U_п = 25 \div 100$ В. Более высокое напряжение возбуждения принимают для машин меньшей мощности, в которых обычно применяют многослойные катушки возбуждения с относительно большим сопротивлением.

По аналогии с (9-17) количество витков дополнительной обмотки статора

$$w_д = N_д p q_1 / a_д, \tag{11-38}$$

где $N_д$ — количество эффективных проводников в пазу; $a_д$ — количество параллельных ветвей фазы дополнительной обмотки.

Параллельные ветви дополнительной обмотки применяют при больших значениях тока возбуждения, требующих значительной площади поперечного сечения проводников. При этом в каждой параллельной ветви должно быть одинаковое количество витков, а стороны катушек находиться в магнитном поле в одинаковых условиях.

Для машин с $h \leqslant 280$ мм количество эффективных проводников дополнительной обмотки в пазу чаще всего принимают $N_д = 2$, а для машин с $h = 315 \div 450$ мм — $N_д = 1$. При определении количества элементарных проводников дополнительной обмотки $c_д$ в одном эффективном руководствуются теми же положениями, что и для основной обмотки. Размеры и количество элементарных проводников основной и дополнительной обмоток, укладываемых по ширине $C_{о.ш}$, $C_{д.ш}$ и по высоте паза $C_{о.в}$, $C_{д.в}$, выбирают с учетом рационального заполнения площади паза и рекомендаций гл. 9.

Предварительное значение номинального фазного тока двигателя (А)

$$I_1' = P_2 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} U_л \eta' \cos \varphi'); \tag{11-39}$$

для генератора

$$I_1' = P_2 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} U_л \cos \varphi'). \tag{11-40}$$

Параметры общие для любой обмотки статора синхронных машин определяют по формулам § 9-4 (указания для дополнительной обмотки приведены в настоящем параграфе).

Обмотка статора с трапецеидальными полузакрытыми пазами. Предварительное среднее значение магнитной индукции в зубцах $B'_{з1}$ следует выбирать из табл. 9-16, но со снижением на 5—10%.

Размеры трапецеидальных пазов определяют по (9-24) — (9-34). При этом следует иметь в виду, что площадь поперечного сечения паза $S''_{п1}$, вычисленная по (9-33), в синхронных машинах с самовозбуждением используется для размещения как основной, так и дополнительной обмоток. В этом случае при определении суммарной площади поперечного сечения изоляционных прокладок между верхней и нижней катушками в пазу, на дне паза и под клином должна быть учтена также прокладка между дополнительной и основной обмотками; суммарная площадь поперечного

сечения прокладок (мм²)

$$S_{пр}=0{,}5b_1+b_2. \qquad (11\text{-}41)$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения основной обмотки (мм²)

$$S''_{п.о}=(0{,}8\div0{,}9)S''_{п1}. \qquad (11\text{-}42)$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника основной обмотки (мм²)

$$S_о=Sc. \qquad (11\text{-}43)$$

Здесь S — площадь поперечного сечения элементарного проводника, мм²; c — количество элементарных проводников в одном эффективном.

Площадь паза (мм²), используемая для размещения дополнительной обмотки,

$$S''_{п.д}=(0{,}1\div0{,}2)S''_{п1} \qquad (11\text{-}44)$$

(при соблюдении условия $S''_{п1}=S''_{п.о}+S''_{п.д}$), а соответствующая ей часть высоты паза (мм)

$$h_{п.д}=(0{,}1\div0{,}2)h_{п1}. \qquad (11\text{-}45)$$

Для определения диаметра изолированного обмоточного провода d' (мм) задаются предварительным значением коэффициента заполнения паза $k'_п$, который не должен превышать 0,75 при ручной укладке обмотки и 0,72 при машинной (с использованием статорообмоточных станков);

$$d'=\sqrt{k'_пS''_{п.о}/(N_{п1}c)}, \qquad (11\text{-}46)$$

где $N_{п1}$ — количество эффективных проводников основной обмотки в пазу.

Количество элементарных проводников c в одном эффективном выбирают так, чтобы диаметр провода с изоляцией не превышал 1,71 мм при ручной укладке и 1,33 мм при машинной. По приложению 1 находят ближайший стандартизированный диаметр изолированного провода d', соответствующий ему диаметр неизолированного провода d и площадь его поперечного сечения S.

Площадь поперечного сечения эффективного проводника дополнительной обмотки (мм²)

$$S_{д.эф}=S_дc_д, \qquad (11\text{-}47)$$

где $S_д$ — площадь поперечного сечения элементарного проводника дополнительной обмотки, мм²; $c_д$ — количество элементарных проводников в одном эффективном.

Коэффициент заполнения паза

$$k_п=[N_{п1}c(d')^2+N_дc_д(d'_д)^2]/S''_{п1}. \qquad (11\text{-}48)$$

Здесь $d'_д$ — диаметр изолированного проводника дополнительной обмотки (среднюю длину витка дополнительной обмотки можно принять равной средней длине витка основной обмотки).

Плотность тока в обмотке статора и уровень удельной тепловой нагрузки в ней определяют по методике, изложенной в § 9-4, при этом выбирают плотность тока в основной и дополнительной обмотках одинаковыми.

Показателем, характеризующим удельную тепловую нагрузку статора, служит произведение линейной нагрузки A_1 на плотность тока J_1 в обмотке. Допустимые значения A_1J_1 для синхронных машин в защищенном исполнении с самовентиляцией, выполненных с изоляцией класса нагревостойкости F, приведены на рис. 11-12. В случае применения изоляционных материалов иного класса нагревостойкости полученные по рис. 11-12 значения A_1J_1 следует умножить на поправочный коэффициент, равный 0,75 (при классе B) или 1,3 (при классе H).

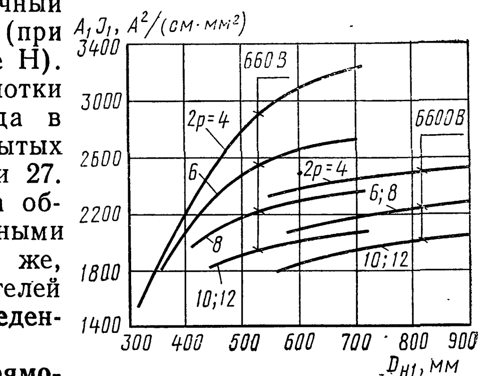


Рис. 11-12. Средние значения $A_1J_1=f(D_{н1})$

Конструкция изоляции обмотки статора из круглого провода в трапецеидальных полузакрытых пазах приведена в приложении 27.

Последовательность расчета обмотки статора с трапецеидальными полузакрытыми пазами такая же, как и для асинхронных двигателей (с учетом дополнений, приведенных в настоящем параграфе).

Обмотка статора с прямоугольными полуоткрытыми и открытыми пазами. Размеры полуоткрытых и открытых прямоугольных пазов синхронных машин и параметры обмотки статора определяют по методике, изложенной в § 9-4. При этом следует иметь в виду, что максимальные значения магнитной индукции в наиболее узком месте зубца $B_{з1max}$, приведенные в табл. 9-16, принимают для синхронных машин со снижением на 5—10%.

Допустимая высота эффективного проводника с витковой изоляцией (мм)

$$a'_{эф}=(c_o h_{п1}-h_и-h_к-h_ш-h_с)/N_в, \qquad (11\text{-}49)$$

где $c_o=0{,}85\div0{,}95$ — коэффициент, учитывающий наличие в пазу дополнительной обмотки.

Размеры основной и дополнительной обмоток статора по высоте паза (мм)

$$h_{п.о}=N_{в.о}c_{о.в}(a+\Delta_{и.а})+h_{и.о}; \qquad (11\text{-}50)$$

$$h_{п.д}=N_{в.д}c_{д.в}(a+\Delta_{и.а})+h_{и.д}. \qquad (11\text{-}51)$$

Здесь $c_{о.в}$ и $c_{д.в}$ — количество элементарных проводников (соответственно основной и дополнительной обмоток) в одном эффективном по высоте пазе; $h_{и.о}$ и $h_{и.д}$ — толщина изоляции основной и дополнительной обмоток по высоте паза.

Проверка возможности размещения обмотки и уточненная высота паза статора в штампе (мм)

$$h_{п1}=h_{п.о}+h_{п.д}+h_к+h_ш+h_с. \qquad (11\text{-}52)$$

Показатели, характеризующие удельную тепловую нагрузку $(A_1 J_1)$ статора, определяют так же, как при трапецеидальных полузакрытых пазах. Средние допускаемые значения $(A_1 J_1)_{доп}$ для обмотки статора с прямоугольными полуоткрытыми и открытыми пазами приведены на рис. 11-12.

Конструкция изоляции обмотки статора из прямоугольного провода, расположенного в полуоткрытых или в открытых пазах, приведена в приложениях 28 и 30.

Последовательность расчета обмотки статора с прямоугольными полуоткрытыми пазами такая же, как для асинхронных двигателей (с учетом дополнений, приведенных в настоящем параграфе).

Примеры расчета машин
3. Обмотка статора. Параметры, общие для обмоток

Для генератора принимаем двухслойную петлевую обмотку с мягкими секциями (см. табл. 9-4) из провода марки ПЭТ-155 (класс нагревостойкости F), укладываемую в трапецеидальные полузакрытые пазы (Приложение 27,*в*). Для двигателя принимаем двухслойную петлевую обмотку с жесткими секциями (см. табл. 9-4) из провода марки ПЭТП-155 (класс нагревостойкости F), укладываемую в прямоугольные открытые пазы (Приложение 30,*б*).

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
96	k_{p1}	(9-9)	$0{,}5/[3{,}5\sin(60°)/(2\times 3{,}5)]=0{,}96$	$0{,}5/[3\sin(60°/2\cdot 3)]=0{,}96$
97	β'_1	§ 9-4	0,8	0,8
98	$y'_{п1}$ (реальные пазы)	(9-11)	$0{,}8\cdot 42/(2\cdot 2)=8{,}4$	$0{,}8\cdot 72/(2\cdot 4)=7{,}2$
99	$y_{п1}$ (реальные пазы)	§ 9-4	8	8
100	β_1	(11-37)	$2\cdot 2\cdot 8/42=0{,}762$	$2\cdot 4\cdot 8/72=0{,}89$
101	k_{y1}	(9-12)	$\sin(0{,}762\cdot 90°)=0{,}93$	$\sin(0{,}89\cdot 90°)=0{,}98$
102	$k_{об1}$	(9-13)	$0{,}96\cdot 0{,}93=0{,}89$	$0{,}96\cdot 0{,}98=0{,}94$
103	w'_1	(9-15)	$\frac{1{,}05}{222\cdot 0{,}89\,(50/50)}\times\frac{400}{17{,}6\cdot 10^{-3}\sqrt{3}}=6{,}97$	$\frac{1{,}07}{222\cdot 0{,}94\,(50/50)}\times\frac{6000}{49{,}7\cdot 10^{-3}\sqrt{3}}=357$
104	a_1	§ 9-4	1	1
105	$N'_{п1}$	(9-16)	$69{,}7\cdot 1/(2\cdot 3{,}5)=9{,}96$	$357\cdot 1/(4\cdot 3)=29{,}9$
106	$N_{п1}$	§ 9-4	10	30
107	w_1	(9-17)	$10\cdot 2\cdot 3{,}5/1=70$	$30\cdot 4\cdot 3/1=360$
108	$N_д$	§ 11-4	2	1
109	$c'_д$	§ 11-4	6	2
110	$a_д$	§ 11-4	2	4
111	$w_д$	(11-38)	$2\cdot 2\cdot 3{,}5/2=7$	$1\cdot 4\cdot 3/4=3$
112	Ф, Вб	(9-18)	$17{,}6\cdot 10^{-3}\cdot 69{,}7/70=17{,}5\cdot 10^{-3}$	$49{,}7\cdot 10^{-3}\cdot 357/360=49{,}5\cdot 10^{-3}$
113	B_δ, Тл	(9-19)	$0{,}77\cdot 69{,}7/70=0{,}767$	$0{,}82\cdot 357/360=0{,}813$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
114	I'_1, А	(11-39)	—	$\frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}94} = 45{,}5$
115	I'_1, А	(11-40)	$\frac{30 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}8} = 54{,}1$	—
116	A_1, А/см	(9-21)	$10 \cdot 10 \cdot 42 \cdot 54{,}1/(3{,}14 \times 286 \cdot 1) = 253$	$10 \cdot 30 \cdot 72 \cdot 45{,}5/(3{,}14 \times 630 \cdot 1) = 497$
117	B'_{c1}, Тл	табл. 9-13	1,6	1,5

Обмотка статора с трапецеидальными полузакрытыми пазами

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
118	$B'_{з1}$, Тл	табл. 9-14, § 11-4	$1{,}9 \cdot 0{,}95 = 1{,}8$	—
119	t_1 мм	(9-22)	$3{,}14 \cdot 286/42 = 21{,}4$	—
120	$b_{з1}$, мм	(9-23)	$21{,}4 \cdot 0{,}767/(0{,}97 \cdot 1{,}8) = 9{,}4$	—
121	h_{c1}, мм	(9-24)	$17{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6/(2 \times 0{,}97 \cdot 160 \cdot 1{,}6) = 35{,}0$	—
122	$h_{п1}$, мм	(9-25)	$[(406-286)/2]-35=25$	—
123	b_1, мм	(9-26)	$[3{,}14\,(286+2 \cdot 25)/42] - 9{,}4 = 15{,}7$	—
124	$h_{ш1}$, мм	§ 9-4	0,5	—
125	$b'_{ш1}$, мм	(9-34) и § 9-4	$0{,}3\sqrt{225} = 4{,}5$	—
126	b_2, мм	(9-27)	$\frac{3{,}14\,(286+2 \cdot 0{,}5-4{,}5)-42 \cdot 9{,}4}{(42-3{,}14)} = 12{,}7$	—
127	проверка b_1 и b_2, мм	(9-28)	$42\,(15{,}7-12{,}7)+3{,}14\,(12{,}7-4{,}5)-2 \times 3{,}14\,(25-0{,}5) \approx 0$	—
128	$S_{п1}$, мм²	(9-29)	$\frac{15{,}7+12{,}7}{2}\left(25-0{,}5-\frac{12{,}7-4{,}5}{2}\right) = 289$	—
129	b_c	§ 9-4	0,2	—
130	h_c, мм	§ 9-4	0,2	—
131	$S'_{п1}$, мм²	(9-30)	$\left(\frac{15{,}7+12{,}7}{2}-0{,}2\right) \times \left(25-0{,}5-\frac{12{,}7-4{,}5}{2}-0{,}2\right) = 282$	—
132	$b_и$, мм	§ 9-17	0,17	—
133	$S_и$, мм²	(9-31)	$0{,}4\,(2 \cdot 25+15{,}7+12{,}7) = 31{,}4$	—

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
134	$S_{пр}$, мм²	(11-41)	0,5·15,7+12,7=20,6	—
135	$S''_{п1}$, мм²	(9-33)	282—31,4—20,6=230	—
136	$S''_{по}$, мм²	(11-42)	0,85·230=195,5	—
137	c	§ 11-4	6	—
138	$k'_{п}$	§ 11-4	0,75	—
139	d', мм	(11-46)	$\sqrt{0,75\cdot 195,5/(10\cdot 6)}=$ =1,56	—
140	d/d', мм/мм	Приложение 1	1,40/1,485	—
141	S, мм²	То же	1,539	—
142	$S_{о}$, мм²	(11-43)	1,539·6=9,234	—
143	$S''_{п.д}$, мм²	(11-44)	0,15·230=34,5	—
144	$h_{п.д}$, мм	(11-45)	0,15·25=3,75	—
145	$c_{д}$	§ 11-4	6	—
146	$d_{д}/d'_{д}$, мм	Приложение 1	1,40/1,485	—
147	$S_{д}$, мм²	То же	1,539	—
148	$S_{эф\cdot д}$, мм²	(11-47)	1,539·6=9,234	—
149	$k_{п}$	(11-48)	$\frac{10\cdot 6\cdot 1,485^2+2\cdot 6\cdot 1,485^2}{230}=0,69$	—
150	$t_{ср1}$, мм	(9-40)	3,14 (286+25)/42=23,3	—
151	$b_{ср1}$, мм	(9-41)	23,3·8=186,4	—
152	$l_{л1}$, мм	(9-42)	(1,16+0,14·2) 186,4+ +15=284	—
153	$l_{ср1}$, мм	(9-43)	2 (160+284)=890	—
154	$l_{в1}$, мм	(9-45)	(0,12+0,15·2) 186,4+ +10=88	—
155	$l_{ср.д}$, мм	§ 11-4	890	—
156	J_1, А/мм²	(9-39)	54,1/(6·1,539·1)=5,86	—
157	A_1J_1, А²/(см·мм²)	§ 11-4	253·5,86=1483	—
158	$(A_1J_1)_{доп}$, А²/(см·мм²)	Рис.11-12	2150>1483	—

Обмотка статора с прямоугольными открытыми пазами

159	$B'_{з1max}$, Тл	Табл. 9-16 § 11-4	—	1,9·0,95=1,8
160	t_1, мм	(9-22)	—	3,14·630/72=27,5
161	$b'_{з1min}$, мм	(9-47)	—	27,5·0,817/(0,95·1,8)= =13,2
162	$b'_{п1}$, мм	(9-48)	—	27,5—13,2=14,3
163	h_{c1}, мм	(9-24)	—	$\frac{49,5\cdot 10^{-3}\cdot 10^6}{2\cdot 0,95\cdot 385\cdot 1,5}=45$
164	$h_{п1}$, мм	(9-25)	—	$\frac{850-630}{2}-45=65$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
165	$h_и$, мм	Приложение 30	—	14,2
166	$2b_и$, мм	То же	—	4,3
167	$h_ш$, мм	§ 9-4	—	1,0
168	$h_к$, мм	§ 9-4	—	3,5
169	$b_{з1min}$, мм	§ 9-4	—	Принимаем 13
170	$b_{п1}$, мм	(9-48)	—	27,5—13,0=14,5
171	$b_с$, мм	§ 9-4	—	0,35
172	$h_с$, мм	§ 9-4	—	0,35
173	$N_ш$	§ 9-4	—	1
174	$b'_{эф}$, мм	(9-50)	—	(14,5—4,1—0,35)/1=10
175	$N_в$	(9-51)	—	30/1=30
176	$a'_{эф}$, мм	(11-49)	—	(0,9·65—12,4—3,5— —1,0—0,35)/30=1,40
177	$S'_{эф}$, мм²	(9-53)	—	1,40·10=14
178	c	§ 9-4	—	2
179	a', мм	(9-54)	—	(1,4/1)—0,28=1,12
180	b', мм	(9-55)	—	(10/1)—0,22=9,78
181	$\Delta_{и.а}/\Delta_{и.в}$, мм	Приложение 3	—	0,28/0,22
182	a, мм	Приложение 2	—	1,12
183	b, мм	То же	—	4,75
184	S, мм²	»	—	5,1
185	$c_{о.в}$	§ 11-4	—	1
186	$c_{д.в}$	§ 11-4	—	2
187	$c_{о.ш}$	§ 11-4	—	2
188	$c_{д.ш}$	§ 11-4	—	2
189	$b_{п1}$, мм	(9-57)	—	1·2 (4,75+0,22)+4,1+ +0,35=14,5
190	$b_{з1min}$, мм	(9-58)	—	27,5—14,5=13,0
191	$B_{з1max}$, Тл	(9-59)	—	27,5·0,817/(13,0·0,95)= =1,82
192	$h_{п.о}$, мм	(11-50)	—	30·1 (1,12+0,30)+ +12,4=55,0
193	$h_{и.д}$, мм	Приложение 30	—	0,5+1,1+0,2=1,8
194	$h_{п.д}$, мм	(11-51)	—	1·2 (1,12+0,30)+1,8= =4,64
195	$h_{п1}$, мм	(11-52)	—	55,0+4,64+3,5+1,0+ +0,35=64,75=64,49
196	$t_{ср1}$, мм	(9-40)	—	3,14 (630+65)/72=30
197	$b_{ср1}$, мм	(9-41)	—	30·8=240
198	$l_{л1}$, мм	(9-61)	—	1,2·240+65+90=443
199	$l_{ср1}$, мм	(9-43)	—	2 (445+443)=1776
200	$l_{в1}$, мм	(9-63)	—	0,35·240+65/2+45=162
201	$l_{ср.д}$, мм	§ 11-4	—	1776
202	J_1, А/мм²	(9-39)	—	45,5/(2·5,1·1)=4,45
203	A_1J_1, А²/(см·мм²)	§ 11-4	—	497·4,45=2210
204	$(A_1J_1)_{доп}$, А²/(см·мм²)	рис. 11-12 § 9-4	—	2240>2210

§ 11-5. Демпферная (пусковая) обмотка

Демпферная обмотка полюсов синхронных машин выполняет ряд функций. В генераторах она служит для снижения уровня динамических перенапряжений в обмотке ротора при несимметричных коротких замыканиях, гашения обратного синхронного поля, улучшения формы ЭДС и симметрии напряжений при несимметричных нагрузках отдельных фаз, успокоения качаний и повышения динамической устойчивости работы. Генераторы малой мощности (до 100 кВт) обычно не имеют демпферной обмотки.

Синхронные двигатели выполняют с демпферной обмоткой, которая служит в качестве пусковой при асинхронном пуске, а также для успокоения качаний в процессе работы. Демпферную обмотку обычно изготовляют из стержней круглого сечения, закладываемых в круглые пазы, равномерно расположенные по дуге полюсных наконечников. Концы стержней замыкают пластинами (сегментами), расположенными вдоль полюсной дуги с обеих сторон полюса. Эти сегменты соединяют между собой по междуполюсному пространству пластинами, образуя короткозамыкающие кольца. Параметры демпферной обмотки устанавливают с учетом следующих условий. Для улучшения демпфирующего эффекта обмотка должна иметь малое активное сопротивление. Поэтому стержни, короткозамыкающие сегменты и соединительные пластины обычно выполняют из меди.

Суммарную площадь поперечного сечения стержней демпферной обмотки на один полюс целесообразно принимать близкой к 15% суммарной площади поперечного сечения меди обмотки статора, приходящейся на одно полюсное деление (мм^2)

$$S_{2\Sigma} \approx 0{,}015\,\tau A_1/J_1. \qquad (11\text{-}53)$$

Для уменьшения добавочных потерь и пульсаций ЭДС обмотки статора желательно принимать зубцовое деление полюсного наконечника ротора t_2 близким к зубцовому делению статора t_1. При q_1, равном целому числу, а также при $q_1 = b + c/d = b + 1/2$ или $bd + c \leqslant 9$ целесообразно выбирать $t_2 = (0{,}8 \div 0{,}95)\, t_1$. При $bd + c > 9$ целесообразно принимать в генераторах $t_2 = t_1$, а в двигателях (чтобы исключить возможность проявления эффекта «прилипания») t_2 должно быть несколько меньше или больше t_1. В приведенных выражениях b — (1, 2, 3, 4 ...); c/d — несократимая дробь.

Предварительное количество стержней демпферной обмотки на один полюс (шт.)

$$N'_2 = 1 + (b_{\text{н.п}} - 20)/t'_2. \qquad (11\text{-}54)$$

Количество стержней демпферной обмотки на полюс N_2 выбирают так, чтобы минимальная ширина крайнего зубца полюсного наконечника $b_{з2\,\min}$ была не менее 3 мм и не превышала $0{,}5\,t_2$.

Предварительный диаметр стержня демпферной обмотки (мм)

$$d_c' = 1{,}13\sqrt{S_{2\Sigma}/N_2}; \qquad (11\text{-}55)$$

принимают значение d'_c, равное ближайшему целому числу, и определяют соответствующее этому диаметру d_c сечение стержня S.

Уточненное значение зубцового деления полюсного наконечника (мм)

$$t_2=(b_{н.п}-d_c-2b_{з2\,min})/(N_2-1). \quad (11.56)$$

Диаметр круглой части паза полюсного наконечника (мм)

$$d_{п2}=d_c+(0,1\div0,15). \quad (11\text{-}57)$$

Размеры шлица паза демпферной обмотки генераторов выбирают так, чтобы ширина $b_{ш2}$ и высота $h_{ш2}$ (рис. 11-13) были примерно одинаковыми (около 3 мм); в двигателях (для увеличения вращающего момента) высоту шлица $h_{ш2}$ принимают 1,5—2 мм.

Для обеспечения механической прочности кромок полюсного наконечника должно соблюдаться условие $h'_{н.п}\geqslant2\,d$. При малых высотах кромок полюсных наконечников крайние пазы демпферной обмотки выполняются закрытыми; при этом $h'_{н.п}/d_c\geqslant1,7$.

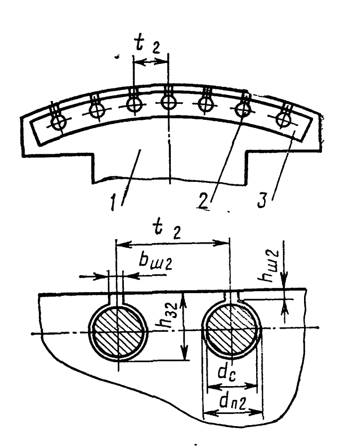


Рис. 11-13. Эскиз полюсного наконечника с пазами демпферной обмотки:

1 — полюс; *2* — стержень демпферной обмотки; *3* — короткозамыкающий сегмент

Предварительная длина стержня демпферной обмотки

$$l'_{ст}=l_1+0,2\,\tau, \quad (11\text{-}58)$$

затем ее уточняют при проработке конструкции машины.

Размеры короткозамыкающих сегментов выбирают такими, чтобы их высота $h_c\geqslant2\,d_c$, толщина $l_c\geqslant0,7\,d_c$, а площадь поперечного сечения S_c составляла около половины суммарной площади поперечного сечения стержней одного полюса (мм²), т. е.

$$S'_c=l_c\,h_c\approx0,5\,S_{2\Sigma}. \quad (11\text{-}59)$$

Окончательно размеры сегмента в поперечном сечении $h_c\times l_c$, а также его площадь в этом сечении S_c следует выбрать по приложению 2.

Площадь поперечного сечения перемычки $S_п$ между сегментами разных полюсов принимают не менее $0,5\,S_c$, а площадь контакта между перемычкой и сегментом — не менее $5\,S_c$.

Примеры расчета машин

4. Демпферная (пусковая) обмотка

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
205	$S_{2\Sigma}$, мм²	(11-53)	—	0,015·247,3·497/4,45=414
206	t'_2, мм	§11-5	—	27,5
207	N'_2, шт.	(11-54)		$1+\frac{173-20}{27,5}=6,6\approx7$
208	d_c', мм	(11-55)	—	$1,13\sqrt{414/7}=8,7$
209	d_c; S, мм; мм²	§11-5	—	10; 78,5
210	$h'_{н.п}/d$	§11-5	—	20,7/10=2,07>1,7
211	$b_{з2min}$, мм	§11-5	—	8

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
212	t_2, мм	(11-56)	—	(173—10—2·8)/(7—1)=24,5
213	$d_{п2}$, мм	(11-57)	—	10+0,1=10,1
214	$b_{ш2}\times h_{ш2}$, мм	§ 11-5	—	3×2
215	$l'_{ст}$, мм	(11-58)	—	445+0,2·247,3=495
216	$S'_{с}$, мм²	(11-59)	—	0,5·414=207
217	$h'_{с}$, мм	§11-5	—	2·10=20
218	$l'_{с}$, мм	§11-5		0,7·10=7,0
219	$h_{с}\times l_{с}$, мм	Приложение 2	—	2×10
220	$S_{с}$, мм²	То же	—	199,1

§ 11-6. Расчет магнитной цепи при холостом ходе

Общие положения. Для построения характеристик намагничивания $\Phi=f(F_\Sigma)$ и х. х. $E=f(F_\Sigma)$ синхронной машины производят расчет магнитной цепи при х. х., который сводится к определению МДС обмотки возбуждения F_Σ при нескольких значениях магнитного потока Ф и соответствующей ему ЭДС обмотки статора E. МДС F_Σ равна сумме МДС отдельных последовательно соединенных участков магнитной цепи, включающей воздушный зазор между полюсным наконечником ротора и сердечником статора, зубцы статора, спинки статора и ротора, сердечник полюса, полюсные наконечники и зазор в стыке полюса и сердечника ротора или полюсного наконечника и полюса.

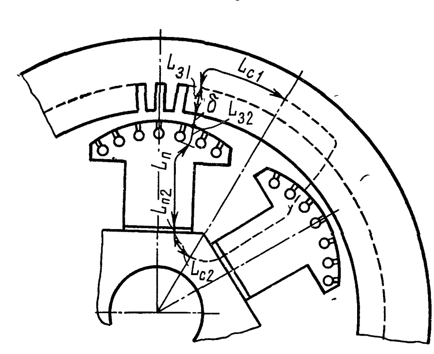


Рис. 11-14. Схема магнитной цепи синхронной машины

Магнитное поле синхронной машины имеет сложную форму в связи с зубчатостью статора и полюсного наконечника (при наличии демпферной обмотки) и насыщением участков ярма и зубцов.

Влияние зубчатости зазора, вентиляционных каналов в сердечнике статора, насыщения зубцовой зоны и спинки статора при расчете синхронных машин, так же как и для асинхронных двигателей (см. § 9-7) и машин постоянного тока (см. § 10-8), учитывают системой коэффициентов и применением таблиц намагничивания $H=f$ (B) для зубцов и спинки статора (см. приложения 8—16).

Поскольку магнитная цепь синхронной машины (рис. 11-14) симметрична, то расчет МДС ведется на один полюс. При этом для каждого участка определяют площадь поперечного сечения,

магнитную индукцию (полагая, что она распределена равномерно по всему сечению рассматриваемого участка), напряженность поля, среднюю длину пути магнитного потока, МДС участка и суммарную МДС цепи.

При расчете магнитной цепи условно принимают среднюю длину пути магнитного потока на отдельных участках магнитопровода. В действительности длина этих путей в спинке статора и ротора различна по середине и по краям полюсного деления. Соответственно неравномерно распределяется магнитная индукция.

Для упрощения расчетов при определении магнитного напряжения спинки статора следует пользоваться кривыми намагничивания, построенными с учетом этого фактора и приведенными в приложениях 11—13. Магнитную цепь синхронных машин рассчитывают в такой последовательности.

МДС для воздушного зазора между сердечником статора и полюсным наконечником. МДС определяют по (9-116) — (9-121). При этом расчетная площадь поперечного сечения воздушного зазора (мм^2)

$$S_\delta = \alpha' \tau (l'_1 + 2\delta). \tag{11-60}$$

Уточненное значение магнитной индукции в воздушном зазоре (Тл)

$$B_\delta = \Phi \cdot 10^6 / S_\delta. \tag{11-61}$$

МДС для зубцов статора синхронных машин. МДС определяют так же, как и для асинхронных двигателей (см. § 9-7).

МДС для зубцов при трапецеидальных полузакрытых пазах статора (см. рис. 9-7). МДС определяют по (9-124) — (9-125) и приложениям 8—10 (при $B_{з1} \leqslant 1{,}8$ Тл) или приложениям 14—16 (при $B_{з1} > 1{,}8$ Тл). При этом расчетная площадь поперечного сечения зубцов статора (мм^2)

$$S_{з1} = z_1 \alpha' l'_1 b_{з1} k_{c1} / (2p) \tag{11-62}$$

Магнитная индукция в равновеликом поперечном сечении зубца (Тл)

$$B_{з1} = \Phi \cdot 10^6 / S_{з1}. \tag{11-63}$$

МДС для зубцов при прямоугольных открытых и полуоткрытых пазах статора МДС (см. рис. 9-9). МДС определяют по (9-122) — (9-126) и приложениям 8—10 (при $B_{з1} \leqslant 1{,}8$ Тл) или по (9-124) — (9-136) и приложениям 14—16 (при $B_{з1} > 1{,}8$ Тл).

Расчетная площадь поперечного сечения зубцов статора (мм^2)

$$S_{з1(1/3)} = z_1 \alpha' l'_1 b_{з1(1/3)} k_c / (2p). \tag{11-64}$$

Магнитная индукция в зубце статора (Тл) на расстоянии 1/3 его высоты от окружности, соответствующей диаметру D_1,

$$B_{з1(1/3)} = \Phi \cdot 10^6 / S_{з1(1/3)}. \tag{11-65}$$

МДС для спинки статора. Расчетная площадь поперечного сечения спинки статора (мм^2) и магнитная индукция (Тл)

$$S_{c1} = h_{c1}\, l_{c1}\, k_c. \tag{11-66}$$

$$B_{c1} = \Phi \cdot 10^6 / 2(S_{c1}). \tag{11-67}$$

Напряженность магнитного поля (А/см) определяют по кривым намагничивания для спинки статора (см. приложения 11—13), а среднюю длину пути магнитного потока (мм) L_{c1} — по (9-166).

МДС для спинки статора (А)

$$F_{c1}=0{,}1\,H_{c1}\,L_{c1}. \quad (11\text{-}68)$$

МДС для зубцов полюсного наконечника

Магнитная индукция в зубцах полюсного наконечника (Тл)	$B_{з2}=t_2B_\delta/k_c(t_2-0{,}94d_{п2})$	(11-69)
Напряженность магнитного поля в зубцах полюсного наконечника (А/см)	$H_{з2}$ — из приложений 5—7, 21	
Средняя длина пути магнитного потока в зубцах полюсного наконечника (мм)	$L_{з2}=h_{ш2}+d_{п2}$	(11-70)
МДС для зубцов полюсного наконечника (А)	$F_{з2}=0{,}1H_{з2}L_{з2}$	(11-71)

МДС для полюсов. Магнитный поток в полюсном сердечнике $\Phi_п$ больше потока в воздушном зазоре Φ на величину потока рассеяния Φ_σ, оцениваемую коэффициентом рассеяния $\sigma=1{,}05\div1{,}2$.

Если величина расчетной магнитной индукции в сердечнике полюса, $B_п\leqslant1{,}6$ Тл, то магнитный поток по высоте полюса изменяется незначительно, поэтому можно принять $B_п=\Phi_п/S_п$.

Активная площадь поперечного сечения полюсного сердечника $S_п$ (мм^2) определяется шириной $b_п$ и длиной $l_п$ полюса (рис. 11—11).

Для найденного значения $B_п$ по приложениям 5, 6, 7, 20 или 21 определяют напряженность поля в сердечнике полюса $H_п$ (А/см). Если $B_п>1{,}6$ Тл, то следует учитывать изменение магнитного потока по высоте полюса, обусловленное рассеянием. В этом случае величину магнитного потока определяют в трех сечениях по высоте полюса — у его основания $\Phi_{п1}$, у полюсного наконечника $\Phi_{п2}$ и в среднем сечении $\Phi_{п.ср}$.

По полученным значениям магнитных потоков и известной площади поперечного сечения сердечника полюса определяют индукции в рассматриваемых сечениях полюса $B_{п1}$, $B_{п2}$, $B_{п.ср}$ и по кривой намагничивания (см. приложение 21) находят соответствующие напряженности магнитного поля $H_{п1}$, $H_{п2}$, $H_{п.ср}$.

МДС для полюсов рассчитывают в такой последовательности.

Полюсные наконечники гребенчатой конструкции (см. рис. 11-6)

Величина выступа полюсного наконечника (мм)	$b''_п=0{,}5(b'_{н.п}-b_п)$	(11-72)
Высота широких полюсных наконечников (мм)	$h_ш=h_{н.п}+\delta-b'^{\,2}_{н.п}/(4D_1)$	(11-73)
Расстояние между боковыми поверхностями широких пакетов смежных полюсных наконечников (мм)	$a_ш=\tau-b_{н.п}-(\pi h_ш/p)$	(11-74)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния в зоне широких пакетов полюсных наконечников	$\lambda_ш=(0{,}5n_шl_шh_ш/a_ш)+$ $+[0{,}43n_шl_шb''_п/(a_ш+b''_п)]+$ $+[0{,}43h_{н.п}b'_{н.п}/(a_ш+0{,}5b'_{н.п})]$	(11-75)

Высота узких (в том числе крайних) полюсных наконечников (мм)	$h_у = h_{н.п} + \delta - [b^2_п/(4D_1)]$	(11-76)
Расстояние между боковыми поверхностями узких (в том числе крайних) пакетов смежных полюсных наконечников, мм	$a_у = \tau - b_п - \pi h_у/p$	(11-77)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния в зоне узких пакетов полюсных наконечников	$\lambda_у = 0{,}5 n_у l_у h_у/a_у$	(11-78)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния в зоне крайних пакетов полюсных наконечников	$\lambda_{кр} = 2 l_{кр} h_у/a_у$	(11-79)
Суммарный коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния полюсных наконечников гребенчатой конструкции	$\lambda_{н.п} = \lambda_ш + \lambda_у + \lambda_{кр}$	(11-80)
Длина пути магнитного потока в полюсе, при отсутствии демпферной обмотки (мм)	$L_п = h'_п + 0{,}7 h_{н.п}$	(11-81)
То же, при наличии демпферной обмотки	$L_п \approx h'_п + 0{,}7 h_{н.п} - h_{з2}$	(11-82)

Полюсные наконечники традиционной конструкции (см. рис. 11-8)

Высота полюсного наконечника (мм)	$h_н = (2h_{н.п} + h'_{н.п})/3$	(11-83)
Расстояние между боковыми поверхностями смежных полюсных наконечников (мм)	$a_{н.п} \approx [\pi(D_1 - 2\delta'' - h'_{н.п})/2p] - b'_{н.п}$	(11.84)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния по внутренним поверхностям полюсных наконечников	$\lambda_{н.п} = 140\left(\frac{h_н}{a_{н.п}} - 0{,}25\right) + 55\left(\frac{b''_п}{a_{н.п}} + 0{,}2\right) - 40\left(\frac{b''_п}{a_{н.п}} - 0{,}5\right)^2$	(11-85)
Длина пути магнитного потока в полюсе при отсутствии демпферной обмотки (мм)	$L_п = h'_п + 0{,}5 h_{н.п}$	(11-86)
То же, при наличии демпферной обмотки	$L_п = h'_п + 0{,}5 h_{н.п} - L_{з2}$	(11-87)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния: по сердечникам полюсов	$\lambda_{п.с} = \frac{55 h'_п}{\tau - b_п - (h'_п + 2h_{н.п} + 2\delta)\pi/(2p)}$	(11-88)
То же, по торцам полюсов	$\lambda_{п.в} = 37 b_п/l_п$	(11-89)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния полюсов	$\lambda_п = \lambda_{н.п} + \lambda_{п.с} + \lambda_{п.в}$	(11-90)
МДС для статора и воздушного зазора (А)	$F_{\delta зс} = F_\delta + F_{з1} + F_{с1}$	(11-91)
Магнитный поток рассеяния полюсов (Вб)	$\Phi_\sigma = 4\lambda_п l_{н.п} F_{\delta зс} \cdot 10^{-11}$	(11-92)
Коэффициент рассеяния магнитного потока	$\sigma = 1 + (\Phi_\sigma/\Phi)$	(11-93)
Расчетная площадь поперечного сечения сердечника полюса (мм²)	$S_п = k_с l_п b_п$	(11-94)

При $B_п \leqslant 1,6$ Тл

Магнитный поток в сердечнике полюса (Вб)	$\Phi_п = \Phi + \Phi_\sigma = \sigma\Phi$	(11-95)
Магнитная индукция в сердечнике полюса (Тл)	$B_п = \Phi_п/(S_п \cdot 10^{-6})$	(11-96)
Напряженность магнитного поля в сердечнике полюса (А/см)	$H_п$ — по приложениям 5—7, 21	

При $B_п > 1,6$ Тл

Магнитный поток у основания полюса (Вб)	$\Phi_{п1} = \Phi + \Phi_\sigma$	(11-97)
То же, у полюсного наконечника	$\Phi_{п2} = \Phi + (\lambda_{н.п}/\lambda_п)\Phi_\sigma$	(11-98)
То же, в среднем сечении полюса	$\Phi_{п.ср} = 0,5(\Phi_{п1} + \Phi_{п2})$	(11-99)
Магнитная индукция у основания полюса (Тл)	$B_{п1} = \Phi_{п1}/(S_п \cdot 10^{-6})$	(11-100)
То же, у полюсного наконечника	$B_{п2} = \Phi_{п2}/(S_п \cdot 10^{-6})$	(11-101)
То же, в среднем сечении полюса	$B_{п.ср} = \Phi_{п.ср}/(S_п \cdot 10^{-6})$	(11-102)
Напряженность магнитного поля у основания полюса, у полюсного наконечника и в среднем сечении полюса (А/см)	$H_{п1}$, $H_{п2}$ и $H_{п.ср}$ по приложениям 5—7, 21	
Расчетная напряженность магнитного поля в сердечнике полюса (А/см)	$H_п = (H_{п1} + 4H_{п.ср} + H_{п2})/6$	(11-103)
МДС для полюса (А)	$F_п = 0,1 L_п H_п$	(11-104)

МДС для спинки ротора

Расчетная площадь поперечного сечения спинки ротора (мм²)	$S_{c2} = l_2 h'_{c2} k_c$	(11-105)
Среднее значение индукции в спинке ротора (Тл)	$B_{c2} = \sigma\Phi \cdot 10^6/(2S_{c2})$	(11-106)
Напряженность магнитного поля в спинке ротора (А/см)	H_{c2} — из приложений 5—7, 21	
Средняя длина пути магнитного потока в спинке ротора (мм)	$L_{c2} = [\pi(D_2 + 2h_{c2})/(4p)] + 0,5h'_{c2}$	(11-107)
МДС для спинки ротора (А)	F_{c2} по (9-170)	

МДС для воздушного зазора в стыке между сердечником полюса и полюсным наконечником (при гребенчатой конструкции ротора) или между сердечниками полюса и ротора (при традиционной конструкции ротора)

Зазор в стыке (мм)	$\delta_{п2} = 2l_п \cdot 10^{-4} + 0,1$	(11-108)
МДС для зазора в стыке между сердечником полюса и полюсным наконечником (А)	$F_{п2} = 0,8\delta_{п2} B_п (n_ш l_ш / l_п) \cdot 10^3$	(11-109)
МДС для зазора в стыке между сердечниками полюса и ротора (А)	$F_{п2} = 0,8\delta_{п2} B_п \cdot 10^3$	(11-110)

Параметры магнитной цепи

Суммарная МДС магнитной цепи (на один полюс) (А)	$F_\Sigma = F_{\delta зс} + F_п + F_{c2} + F_{п2} + F_{з2}$	(11-111)
Коэффициент насыщения магнитной цепи	$k_{нас} = F_\Sigma/(F_\delta + F_{п2})$	(11-112)

Характеристики намагничивания и холостого хода. Расчет характеристик намагничивания $\Phi = f(F_2)$ и х. х. $E = f(F_2)$ может быть выполнен в физических или относительных единицах. Обыч-

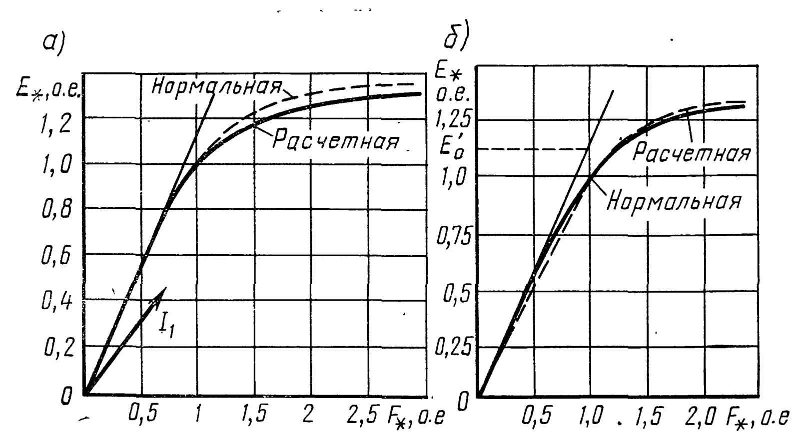


Рис. 11-15. Характеристики холостого хода к примерам расчета:
а — генератора; *б* — двигателя

но расчет ведется в относительных единицах для нескольких значений магнитного потока в воздушном зазоре Φ_* или ЭДС E_* в пределах от 0,5 до 1,3 о. е. При этом в качестве базового значения магнитного потока принимают его величину $\Phi_{(1)}$ при номинальном фазном напряжении, а базовое значение МДС соответствует МДС обмотки возбуждения $F_{\Sigma(1)}$ при х. х. и номинальном фазном напряжении U_1. В таком случае обе характеристики выражаются одной и той же кривой.

Характеристики х. х. рассчитывают по приведенной методике, а результаты оформляют в виде табл. 11-2 и 11-3, полагая, что магнитный поток в воздушном зазоре (Вб)

$$\Phi=\Phi_* \Phi_{(1)}. \quad (11\text{-}113)$$

ЭДС обмотки статора (В)

$$E=E_* U_1. \quad (11\text{-}114)$$

Магнитная индукция в воздушном зазоре (Тл)

$$B_\delta=\Phi_* B_{\delta(1)}. \quad (11\text{-}115)$$

Суммарная МДС для спинки ротора (А)

$$F_{c2}\approx F_{c2(1)} E_*. \quad (11\text{-}116)$$

Суммарная МДС для полюса и спинки ротора (А)

$$F_{пс}=F_п+F_{c2}+F_{п2}+F_{з2}. \quad (11\text{-}117)$$

Расчетную характеристику х. х. рекомендуется сравнить с нормальной, которую строят по следующим данным:

$E_*=E/U_1$	0	0,5	1,0	1,1	1,2	1,3
$F_*=F_\Sigma/F_{\Sigma(1)}$	0	0,47	1,0	1,17	1,4	2,0

Расхождение расчетной и нормальной характеристик в рабочей зоне не должно превышать 15%.

5. Расчет магнитной цепи

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
			При $\Phi_*=1,0$	
			Воздушный зазор	
221	S_δ, мм²	(11-60)	$0,66\cdot 224,5\,(160+2\cdot 1)=$ $=24\,000$	$0,66\cdot 247,3\,(385+2\cdot 2,5)=$ $=63\,700$
222	B_δ, Тл	(11-61)	$17,5\cdot 10^{-3}\cdot 10^6/24\,000=$ $=0,73$	$49,5\cdot 10^{-3}\cdot 10^6/63\,700=$ $=0,78$
223	$k_{\delta 1}$	(9-116)	$1+\dfrac{4,5}{21,4-4,5+5\cdot 1\times}=$ $\times 21,4/4,5$ $=1,16$	$1+\dfrac{14,5}{27,5-14,5+5\times}=$ $\times 2,5\cdot 27,5/14,5$ $=1,389$
224	$k_{\delta 2}$	(9-117)	—	$1+\dfrac{3}{24,5-3+5\times}=1,024$ $\times 2,5\cdot 24,5/3$
225	$k_к$	(9-118)	—	$1-\dfrac{3\cdot 2,5}{55+3\cdot 2,5\times}=0,927$ $\times(1+55/10)$
226	k_δ	(9-120)	1,16	$1,389\cdot 1,024\cdot 0,927=1,32$
227	F_δ, А	(9-121)	$0,8\cdot 1\cdot 1,16\cdot 0,73\cdot 10^3=679$	$0,8\cdot 2,5\cdot 1,32\cdot 0,78\cdot 10^3=$ $=2060$
			Зубцы статора	
228	$S_{з1}$, мм²	(11-62)	$42\cdot 0,66\cdot 160\cdot 9,4\times$ $\times 0,97/(2\cdot 2)=10,11\cdot 10^3$	—
229	$t_{1\,(1/3)}$, мм	(9-122)	—	$3,14\,(630+2\cdot 65/3)/72=$ $=29,5$
230	$b_{з1\,(1/3)}$, мм	(9-126)	—	$29,5-14,5=15,0$
231	$S_{з1\,(1/3)}$, мм²	(11-64)	—	$72\cdot 0,66\cdot 385\cdot 15,0\times$ $\times 0,95/(2\cdot 4)=32,58\cdot 10^3$
232	$B_{з1}$, Тл	(11-63)	$17,5\cdot 10^{-3}\cdot 10^6/(10,11\times$ $\times 10^3)=1,74$	—
233	$B_{з1\,(1/3)}$, Тл	(11-65)	—	$49,5\cdot 10^{-3}\cdot 10^6/(32,58\times$ $\times 10^3)=1,52$
234	$H_{з1}$, А/см	приложение 9	—	11,7
235	$H_{з1}$, А/см	приложение 8	12,9	—
236	$L_{з1}$, мм	(9-124)	25,0	65,0
237	$F_{з1}$, А	(9-125)	$0,1\cdot 12,9\cdot 25,0=32$	$0,1\cdot 11,7\cdot 65,0=76$
			Спинка статора	
238	$S_{с1}$, мм²	(11-66)	$35,0\cdot 160\cdot 0,97=5430$	$45\cdot 385\cdot 0,95=16460$
239	$B_{с1}$, Тл	(11-67)	$\dfrac{17,5\cdot 10^{-3}\cdot 10^6}{2\cdot 5430}=1,61$	$\dfrac{49,5\cdot 10^{-3}\cdot 10^6}{2\cdot 16\,460}=1,50$
240	$H_{с1}$, А/см	приложение 11	7,88	—
241	$H_{с1}$, А/см	приложение 12	—	9,05

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
242	L_{c1}, мм	(9-166)	3,14 (406—35)/(4·2)=146	3,14 (850—45)/(4·4)=158
243	F_{c1}, А	(11-68)	0,1·7,88·146=37	0,1·9,05·158=49
		Зубцы полюсного наконечника		
244	$B_{з2}$, Тл	(11-69)	—	24,5·,078/[0,98 (24,5——0,94·10)]=1,29
245	$H_{з2}$, А/см	приложение 21	—	13,4
246	$L_{з2}$, мм	(11-70)	—	2+10=12
247	$F_{з2}$, А	(11-71)	—	0,1·13,4·12=15
		Полюсы		
248	$b''_{п}$, мм	(11-72)	0,5 (162—78)=42	0,5 (170—85)=42,5
249	$h_{ш}$, мм	(11-73)	28+1—162²/(4·286)=6,1	—
250	$a_{ш}$, мм	(11-74)	224,5—173—(3,14××6,1/2)=42	—
251	$\lambda_{ш}$	(11-75)	(0,5·5·24·6,1/42)++[0,43·5·24·42/(42++42)]+[0,43·28××162/(42+0,5·162)]=49	—
252	$h_{у}$, мм	(11-76)	28+1—[78²/(4·286)]==23,4	—
253	$a_{у}$, мм	(11-77)	224,5—78—3,14××23,4/2=107,8	—
254	$\lambda_{у}$	(11-78)	0,5·4·8·23,4/107,8=5,2	—
255	$\lambda_{кр}$	(11-79)	2·9·23,4/107,8=3,9	—
256	$\lambda_{н.п}$	(11-80)	49+5,2+3,9=58,1	—
257	$L_{п}$, мм	(11-81)	63+0,7·28=84,6	—
258	$h_{н}$, мм	(11-83)	—	(2·30+17)/3=25,6
259	$a_{н.п}$, мм	(11-84)	—	[3,14 (630—2·3,3——17)/(2·4)]—170=68
260	$\lambda_{н.п}$	(11-85)	—	$140\left(\frac{25,6}{68}-0,25\right)+ +5,5\left(\frac{42,5}{68}+0,2\right)- -40\left(\frac{42,5}{68}-0,5\right)^2=62,4$
261	$L_{п}$, мм	(11-87)	—	103+0,5·30—12=106
262	$\lambda_{п.с}$	(11-88)	$\frac{55\cdot63}{224,5-78-[(63+2\times28+2\cdot1)\cdot\pi/4]}=64,5$	$\frac{55\cdot103}{247,3-85-[(103+2\times30+2\cdot2,5)\cdot3,14/8]}=62,9$
263	$\lambda_{п.в}$	(11-89)	37·78/170=17,4	37·95/460=6,8
264	$\lambda_{п}$	(11-90)	58,1+74,5+17,4=150	62,4+62,9+6,8=132,1
265	$F_{\delta зс}$, А	(11-91)	679+32+37=748	2060+76+49=2185
266	Φ_{σ}, Вб	(11-92)	$4\cdot150\cdot170\cdot748\cdot10^{-11}=0,763\cdot10^{-3}$	$4\cdot132,1\cdot460\cdot2185\cdot10^{-11}=5,58\cdot10^{-3}$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
267	σ	(11-93)	$1+[0,763\cdot10^{-3}/(17,55\times\times10^{-3})]=1,043$	$1+[5,58\cdot10^{-3}/(49,5\times\times10^{-3})]=1,11$
268	$S_п$, мм^2	(11-94)	$0,97\cdot170\cdot78=13,2\cdot10^3$	$0,98\cdot460\cdot85=38,32\cdot10^3$
269	$\Phi_п$	(11-95)	$17,55\cdot10^{-3}+0,763\times\times10^{-3}=18,31\cdot10^{-3}$	$49,5\cdot10^{-3}+5,58\cdot10^{-3}==55,08\cdot10^{-3}$
270	$B_п$, Тл	(11-96)	$18,31\cdot10^{-3}/(13,2\cdot10^3\times\times10^{-6})=1,42$	$55,08\cdot10^{-3}/(38,32\cdot10^3\times\times10^{-6})=1,44$
271	$H_п$, А/см	приложение 5	3,5	—
272	$H_п$, А/см	приложение 21	—	23,7
273	$L_п$, мм	(11-81)	$63+0,7\cdot28=84,6$	—
274	$L_п$, мм	(11-87)	—	$103+0,5\cdot30-12=106$
275	$F_п$, А	(11-104)	$0,1\cdot84,6\cdot3,5=30$	$0,1\cdot106\cdot23,7=251$

Спинка ротора

276	$S_{с2}$, мм^2	(11-105)	$170\cdot49\cdot0,97=8080$	$460\cdot180\cdot0,98=81\,150$
277	$B_{с2}$, Тл	(11-106)	$1,043\cdot17,5\cdot10^{-3}\times\times10^6/(2\cdot8080)=1,13$	$1,11\cdot9,5\cdot10^{-3}\times\times10^6/(2\cdot81\,150)=0,34$
278	$H_{с2}$, А/см	приложение 5	1,28	—
279	$H_{с2}$, А/см	приложение 21	—	2,64
280	$L_{с2}$, мм	(11-107)	$\frac{3,14\,(72+2\cdot13)}{4\cdot2}+0,5\times\times49=63$	$\frac{3,14\,(184+288)}{4\cdot4}+0,5\times\times180=223$
281	$F_{с2}$, А	(9-170)	$0,1\cdot63\cdot1,28=8$	$0,1\cdot223\cdot2,64=60$

Воздушный зазор в стыке полюса

282	$\delta_{п2}$, мм	(11-108)	$2\cdot170\cdot10^{-4}+0,1=0,13$	$2\cdot460\cdot10^{-4}+0,1=0,19$
283	$F_{г2}$, А	(11-109)	$0,8\cdot0,13\cdot1,42\,\frac{5\cdot24}{170}\times\times10^3=104$	—
284	$F_{п2}$, А	(11-110)	—	$0,8\cdot0,19\cdot1,44\cdot10^3=220$
285	$F_{г.с}$, А	(11-117)	$30+8+104=142$	$251+60+220+15=546$

Общие параметры магнитной цепи

286	$F_{\Sigma(1)}$, А	(11-111)	$748+142=890$	$2185+546=2731$
287	$k_{нас}$	(11-112)	$890/(679+104)=1,14$	$2731/(2060+220)=1,19$

Таблица 11-2

Наименование участка	Средняя длина пути магнитного потока, мм	Площадь поперечного сечения участка, мм²	Ф; E о. е.	0,5			1,0			1,1			1,2			1,3		
			Ф, Вб	$8{,}775\cdot10^{-3}$			$17{,}55\cdot10^{3}$			$19{,}30\cdot10^{-3}$			$21{,}06\cdot10^{-3}$			$22{,}82\cdot10^{-3}$		
			E, В	115,5			231			254,1			277			300		
			Коэффициенты	B, Тл	H, А/см	F, А	B, Тл	H, А/см	F, А	B, Тл	H, А/см	F, А	B, Тл	H, А/см	F, А	B, Тл	H, А/см	F, А
Зазор между сердечником статора и полюсным наконечником	1,0	2 400	$k_\delta=1{,}16$	0,365	—	340	0,73	—	679	0,803	—	747	0,876	—	815	0,949	—	883
Зубцы статора	25,0	10 110	$k_c=0{,}97$	0,868	2,76	7	1,74	12,9	32	1,91	23,5	59	2,08	45	113	2,25	115	288
Спинка статора	146,0	5 430	$k_c=0{,}97$	0,907	1,25	12	1,61	7,88	37	1,77	17	67	1,94	44,9	164	2,10	100	336
Сердечник полюса	84,6	13 200	$k_c=0{,}97$	0,71	0,79	7	1,42	3,5	30	1,56	12,4	107	1,65	27	232	1,81	80	688
Зазор в стыке полюса и полюсного наконечника	0,13			0,71	—	52	1,42	—	104	1,56	—	115	1,72	—	126	1,89	—	139
Спинка ротора	63	8 080	$k_c=0{,}97$	0,58	0,67	4	1,13	1,28	8	1,25	1,7	11	1,37	2,7	17	1,51	6,7	42
$F_{\delta\,зс}=F_\delta+F_{з1}+F_{с1}$, А				340+7+12==359			679+32+37==748			747+59+67==873			815+113+164==1092			883+288++336=1507		
$F_{\delta\,зс*}=F_{\delta\,зс}/F_{\Sigma\,(1)}$, о. е.				359/890=0,40			0,84			0,98			1,227			1,69		
$\Phi_\sigma=1{,}02\cdot10^{-6}\,F_{\delta\,зс}$, Вб				$0{,}366\cdot10^{-3}$			$0{,}763\cdot10^{-3}$			$0{,}890\cdot10^{-3}$			$1{,}114\cdot10^{-3}$			$1{,}537\cdot10^{-3}$		
$\Phi_{\sigma*}=\Phi_\sigma/\Phi_{(1)}$, о. е.				$0{,}366^{-3}/17{,}55\times\times10^{-3}=0{,}02$			0,044			0,051			0,063			0,087		
$\Phi_{п1}=\Phi+\Phi_\sigma$, Вб				$8{,}775\cdot10^{-3}++0{,}366\cdot10^{-3}==9{,}14\cdot10^{-3}$			$18{,}31\cdot10^{-3}$			$20{,}19\cdot10^{-3}$			$22{,}17\cdot10^{-3}$			$24{,}39\cdot10^{-3}$		
$\Phi_{п1*}=\Phi_{г1}/\Phi_{(1)}$, о. е.				0,52			1,043			1,15			1,26			1,39		
$\Phi_{п2}=\Phi+0{,}387\,\Phi_\sigma$, Вб				—			—			—			$21{,}49\cdot10^{-3}$			$23{,}42\cdot10^{-3}$		
$\Phi_{п.ср}=0{,}5\,(\Phi_{п1}+\Phi_{п2})$, Вб				$9{,}14\cdot10^{-3}$			$18{,}31\cdot10^{-3}$			$20{,}19\cdot10^{-3}$			$21{,}8\cdot10^{-3}$			$23{,}9\cdot10^{-3}$		
$\Phi_{п.ср*}=\Phi_{п.ср}/\Phi_{(1)}$, о. е.				0,52			1,043			1,15			1,24			1,36		
$F_{п.с}=F_п+F_{с2}+F_{п2}$, А				7+4+52=63			30+8+104=142			107+11+115==233			232+17+126==375			688+42++138=868		
$F_{п.с*}=F_{п.с}/F_{\Sigma\,(1)}$, о. е.				0,07			0,16			0,26			0,42			0,98		
$F_\Sigma=F_{\delta\,зс}+F_{пс}$, А				359+63=422			748+142=890			873+233=1106			1092+375==1467			1507+868==2375		
$F_{\Sigma*}=F_\Sigma/F_{\Sigma\,(1)}$, о. е.				0,47			1,0			1,24			1,65			2,67		

Таблица 11-3

Наименование участка	Средняя длина пути магнитного потока, мм	Площадь поперечного сечения участка, мм²	Φ, E о. е	0,5			1,0			1,1			1,2			1,3		
			Φ, Вб	$24,75 \cdot 10^{-3}$			$49,5 \cdot 10^{-3}$			$54,45 \cdot 10^{-3}$			$59,4 \cdot 10^{-3}$			$64,35 \cdot 10^{-3}$		
			E, В	1732			3464			3810			4157			4503		
			Коэффициенты	B, Тл	H, А/см	F, А	B, Тл	H, А/см	F, А	B, Тл	H, А/см	F, А	B, Тл	H, А/см	F, А	B, Тл	H, А/см	F, А
Зазор между сердечником статора и полюсным наконечником	2,5	63 700	$k_\delta=1,32$	0,39	—	1025	0,78	—	2060	0,855	—	2257	0,932	—	2460	1,01	—	2666
Зубцы статора	65	32 580	$k_c=0,95$	0,760	2,72	18	1,52	11,7	76	1,67	17,5	114	1,82	29,2	190	1,975	60	390
Спинка статора	158	16 460	$k_c=0,95$	0,75	2,67	23	1,50	9,05	49	1,65	16,5	78	1,80	27	111	1,95	53,3	202
Зубцы полюсного наконечника	12	—	$k_c=0,98$	0,605	4,9	6	1,22	13,4	15	1,33	17,2	19	1,45	24,4	27	1,57	37,0	41
Сердечник полюса	111	38 320	$k_c=0,98$	0,72	6,03	65	1,44	23,7	251	1,58	38,3	429	1,68	58,6	650	1,83	143	1572
Зазор в стыке полюса и сердечника ротора	0,19	38 320		0,695	—	109	1,44	—	220	1,58	—	230	1,68	—	251	1,83	—	275
Спинка ротора	223	81 150	$k_c=0,98$	0,16	1,28	30	0,33	2,64	60	0,37	2,96	67	0,40	3,20	74	0,45	3,60	83
$F_{\delta\,зс} = F_\delta + F_{з1} + F_{с1}$, А				1025+18+23==1066			2060+76+49==2185			2257+114+78==2449			2460+190+111==2761			2666+390+202==3258		
$F_{\delta\,зс*} = F_{\delta\,зс}/F_{\Sigma\,(1)}$, о. е.				0,39			0,80			0,90			1,02			1,20		
$\Phi_\sigma = 2,55 \cdot 10^{-6}\, F_{\delta\,зс}$, Вб				$2,72 \cdot 10^{-3}$			$5,58 \cdot 10^{-3}$			$6,26 \cdot 10^{-3}$			$7,06 \cdot 10^{-3}$			$8,33 \cdot 10^{-3}$		
$\Phi_{\sigma*} = \Phi_\sigma/\Phi_{(1)}$, о. е.				0,055			0,113			0,127			0,142			0,168		
$\Phi_{п1} = \Phi + \Phi_\sigma$, Вб				$24,75 \cdot 10^{-3}+2,72 \times 10^{-3}=27,47 \cdot 10^{-3}$			$49,5 \cdot 10^{-3}+5,58 \times 10^{-3}=55,08 \cdot 10^{-3}$			$54,45 \cdot 10^{-3}+6,26 \times 10^{-3}=60,71 \cdot 10^{-3}$			$59,4 \cdot 10^{-3}+7,06 \times 10^{-3}=66,46 \cdot 10^{-3}$			$64,35 \cdot 10^{-3}+8,33 \times 10^{-3}=72,66 \cdot 10^{-3}$		
$\Phi_{п1*} = \Phi_{п1}/\Phi_{(1)}$, о. е.				0,555			1,113			1,226			1,342			1,467		
$\Phi_{п2} = \Phi + 0,47\,\Phi_\sigma$, Вб				—			—			—			$62,61 \cdot 10^{-3}$			$68,14 \cdot 10^{-3}$		
$\Phi_{п.ср} = 0,5\,(\Phi_{п1} + \Phi_{п2})$, Вб				$27,47 \cdot 10^{-3}$			$55,11 \cdot 10^{-3}$			$60,71 \cdot 10^{-3}$			$64,53 \cdot 10^{-3}$			$70,40 \cdot 10^{-3}$		
$\Phi_{п.ср*} = \Phi_{п.ср}/\Phi_{(1)}$, о. е.				0,55			1,11			1,22			1,30			1,42		
$F_{пс} = F_п + F_{с2} + F_{з2}$, А				65+30+109+6==210			251+60+220++15=546			429+67+230++19=745			650+74+251++27=1002			1572+83+275++41=1971		
$F_{пс*} = F_{пс}/F_{\Sigma\,(1)}$, о. е.				0,07			0,19			0,26			0,33			0,69		
$F_\Sigma = F_{\delta\,зс} + F_{пс}$, А				1066+201=1276			2185+546=2731			2449+745=3194			2761+1002=3763			3258+1971=5229		
$F_{\Sigma*} = F_\Sigma/F_{\Sigma\,(1)}$, о. е.				0,47			1,0			1,16			1,37			1,91		

Аналогичным образом выполнены расчеты магнитной цепи при других значениях магнитного потока; в частности, при $\Phi=1,2$; 1,3 о. е. В рассматриваемых примерах магнитная индукция в сердечнике полюса превышает 1,6 Тл, в связи с этим расчет МДС произведен с учетом изменения величины магнитного потока, по высоте полюса согласно (11-97) — (11-103). Результаты расчетов сведены в табл. 11-2 и 11-3, по которым построены характеристики х. х., приведенные на рис. 11-15.

§ 11-7. Активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки статора

Определение активных и индуктивных сопротивлений обмотки статора необходимо для расчета режима х. х., номинальных параметров и рабочих характеристик синхронной машины.

Активное сопротивление обмотки статора рассчитывают для температуры 20 °С; при определении рабочих характеристик его приводят к стандартной рабочей температуре, соответствующей классу нагревостойкости применяемой изоляции путем умножения на коэффициент $m_т$ (см. § 4-1).

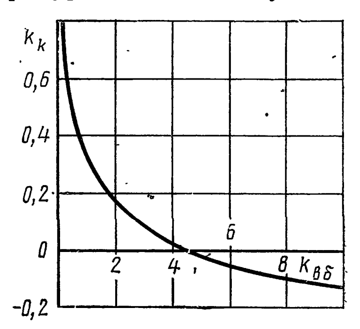


Рис. 11-16. Зависимость $k_к=f(k_{вδ})$

При расчете индуктивных сопротивлений обмотки статора поле рассеяния (как в асинхронных машинах, § 9-8) условно разбивают на составляющие: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмоток. Для каждой составляющей определяют магнитную проводимость, суммируют эти проводимости и по ним рассчитывают индуктивное сопротивление обмотки.

При этом необходимо иметь в виду, что коэффициент проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_д$, связанный с высшими гармоническими поля статора, для явнополюсных синхронных машин обычно меньше, чем для асинхронных, в связи с большим воздушным зазором. Влияние формы воздушного зазора на $\lambda_д$ учитывают поправочным коэффициентом $C_д$. При равномерном зазоре $C_д=1$; при эксцентричном — $C_д=0,85\div0,95$ (меньшее значение принимают при $\delta''/\delta'=1,5$ и $\alpha>0,7$)

$$\lambda_{д1}=0,03\,\tau\,\alpha'\,C_д/(\delta\,k_\delta\,q_1). \qquad (11\text{-}118)$$

Коэффициент дифференциального рассеяния обмотки статора $k_{д1}$ определяют по табл. 9-23. При нахождении коэффициента $k_{р1}$ по табл. 9-22 под z_2 следует понимать число пазов (стержней) демпферной обмотки, приходящееся на один полюс. При отсутствии демпферной обмотки полагают $k_{р1}=1$.

При определении индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора синхронной машины следует учитывать также рас-

6. Активное и индуктивное сопротивление обмотки статора для установившегося режима

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный регенератор	Синхронный двигатель
288	r_1, Ом	(9-178)	$70\cdot890/(57\cdot1\cdot6\cdot1,539\cdot10^3)=0,118$	$360\cdot1776/(57\cdot1\cdot2\cdot5,1\cdot10^3)=1,099$
289	r_{1*}, о. е.	(9-179)	$0,118\cdot54,1\sqrt{3}/400=0,0276$	$1,099\cdot45,5\sqrt{3}/6000=0,0144$
290	Проверка r_{1*}, о. е.	(9-180)	$\frac{3,14\cdot286\cdot253\cdot5,86}{114\cdot10^4\cdot3\cdot400}\times\frac{890\sqrt{3}}{54,1}=0,0276$	$\frac{3,14\cdot630\cdot497\cdot4,45}{114\cdot10^4\cdot3\cdot6000}\times\frac{1776\sqrt{3}}{45,5}=0,0144$
291	$r_д$, Ом	(9-178)	$7\cdot890/(57\cdot2\cdot6\cdot1,539\cdot10^3)=0,006$	$3\cdot1776/(57\cdot4\cdot2\cdot5,1\cdot10^3)=0,0023$
292	Размеры паза, мм	рис. 9-7 и 9-9, табл. 9-21	$b_{ш1}=4,4$; $b_2=12,7$; $h_{к1}=3$; $h_{ш1}=0,5$; $h_{п1}=25,0$; $h_2=0,06$; $h_1=17,8$	$b_{п1}=14,5$; $h_{ш1}=1$; $h_{к1}=3,5$; $h_2=2,55$; $h_{п1}=65$; $h_3=5$; $h_1=47,6$
293	$k_{\beta1}$	(9-181)	$0,4+0,6\cdot0,762=0,86$	$0,4+0,6\cdot0,89=0,93$
294	$k'_{\beta1}$	(9-182)	$0,2+0,8\cdot0,762=0,81$	$0,2+0,8\cdot0,89=0,91$
295	$\lambda_{п1}$	(9-185)	$\frac{17,8\cdot0,86}{3\cdot12,7}+\left(\frac{3\cdot3}{12,7+2\cdot44}+\frac{0,5}{4,4}+\frac{0,6}{12,7}\right)0,81=1,154$	—
296	$\lambda_{п1}$	(9-187)	—	$\frac{5}{4\cdot14,5}+\frac{47,6-5}{3\cdot14,5}\times0,93+\frac{3,5+1+2,55}{14,5}0,91-=1,92$
297	$\lambda_{д1}$	(11-118)	$0,03\frac{224,5\cdot0,66\cdot1}{1\cdot1,16\cdot3,5}=1,092$	$0,03\frac{247,3\cdot0,66\cdot0,95}{2,5\cdot1,32\cdot3}=0,47$
298	$\lambda_{л1}$	(9-191)	$0,34\frac{3,5}{160}(284-0,64\times0,762\cdot224,5)=1,3$	$0,34\frac{3}{445}(443-0,64\times0,89\cdot247,3)=0,69$
299	$k_{в\delta}$	(11-120)	$4,5/(1\cdot1,16)=3,78$	$14,5/(2,5\cdot1,32)=4,39$
300	$k_к$	рис. 11-16	0,02	0,01
301	$\lambda_к$	(11-119)	$0,04+0,02+0,07\times\sqrt{(21,4-4,4)/4,4}=0,2$	$0,04+0,01+0,07\times\sqrt{(27,5-14,3)/14,3}=0,11$
302	λ_1	(11-121)	$1,154+1,092+1,3+0,2=3,8$	$1,92+0,47+0,69+0,11=3,17$
303	x_σ, Ом	(9-193)	$\frac{1,58\cdot50\cdot160\cdot70^2}{2\cdot3,5\cdot10^8}3,8=0,336$	$\frac{1,58\cdot50\cdot445\cdot360^2}{4\cdot3\cdot10^8}3,17=12,05$
304	$x_{\sigma*}$, о. е.	(9-194)	$0,336\cdot54,1\cdot\sqrt{3}/400=0,0787$	$12,05\cdot45,5\cdot\sqrt{3}/6000=0,159$
305	Проверка $x_{\sigma*}$, о. е.	(9-195)	$\frac{0,39(286\cdot253)^2\,160\cdot3,8}{\sqrt{3}\cdot400\cdot54,1\cdot1,42\cdot10^7}=0,0788$	$\frac{0,39(630\cdot497)^2\,445\cdot3,17}{\sqrt{3}\cdot6000\cdot45,5\cdot72\cdot10^7}=0,159$

сеяние между коронками зубцов, коэффициент проводимости которого

$$\lambda_к = 0{,}04 + k_к + 0{,}07\sqrt{(t_1 - b_{ш1})/b_{ш1}}. \qquad (11\text{-}119)$$

Здесь $b_{ш1}$ — ширина открытия паза (при открытых пазах $b_{ш1} = b_{п1}$); $k_к$ — коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов статора на магнитную проводимость рассеяния между коронками зубцов, определяемый в зависимости от коэффициента зубцовой зоны статора (рис. 11-16)

$$k_{вδ} = b_{ш1}/(\delta k_\delta). \qquad (11\text{-}120)$$

Суммарный коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1} + \lambda_к. \qquad (11\text{-}121)$$

Здесь коэффициенты магнитной проводимости потока рассеяния определяют для пазовой части $\lambda_{п1}$ — по (9-185) — (9-187) для лобовых частей $\lambda_{л1}$ — по (9-191). При этом значение h_i должно быть уменьшено на $h_{п.д}$, определяемую по (11-45).

Правильность определения активного и индуктивного сопротивления обмотки статора проверяют путем расчета r_{1*} и $x_{\sigma*}$ по разным формулам (9-179), (9-180), (9-194) и (9-195), результаты расчета должны совпадать. Сопротивления обмотки статора рассчитывают в последовательности, изложенной в § 9-8.

Пример расчета см. на стр. 350.

§ 11-8. Расчет магнитной цепи при нагрузке

Основные положения. При нагрузке обмотка статора создает поле реакции якоря. Из-за неравномерности воздушного зазора и соответственно магнитного сопротивления вдоль окружности расточки статора явнополюсных синхронных машин возникает необ-

Таблица 11-4

α	Значения коэффициентов при								
	δ''/δ'=1			δ''/δ'=1,5			δ''/δ'=2		
	δ/τ=0	0,01	0,3	δ/τ=0	0,01	0,03	δ/τ=0	0,01	0,03
				Коэффициент k_{ad}					
0,5	0,91	0,90	0,89	0,93	0,92	0,91	0,93	0,92	0,91
0,6	0,88	0,87	0,86	0,90	0,89	0,88	0,90	0,89	0,88
0,7	0,85	0,84	0,83	0,87	0,86	0,86	0,88	0,87	0,87
0,8	0,82	0,81	0,80	0,85	0,84	0,84	0,85	0,84	0,84
0,9	0,80	0,80	0,79	0,83	0,82	0,82	0,83	0,82	0,82
				Коэффициент k_{aq}					
0,5	0,2	0,27	0,35	0,18	0,25	0,34	0,17	0,23	0,33
0,6	0,29	0,35	0,42	0,25	0,32	0,40	0,22	0,30	0,38
0,7	0,39	0,44	0,51	0,35	0,40	0,48	0,31	0,37	0,44
0,8	0,50	0,55	0,61	0,45	0,50	0,56	0,40	0,45	0,51
0,9	0,64	0,68	0,71	0,56	0,61	0,63	0,50	0,53	0,57

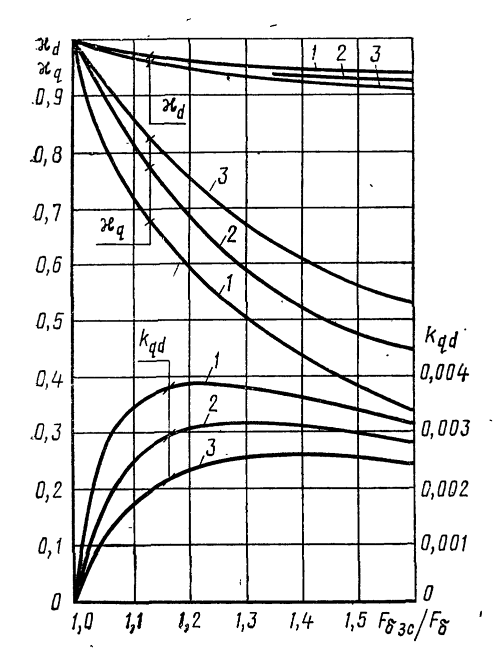


Рис. 11-17. Зависимость k_{qd}, $\varkappa_d$, $\varkappa_q = f(F^\delta_{зс}/F^\delta)$

1 — при $\delta''/\delta'=1$; 2 — при $\delta''/\delta'=1{,}5$; 3 — при $\delta''/\delta'=2$

ходимость рассматривать действие реакции якоря F_a по продольной d и поперечной q осям в отдельности. При этом $F_d=F_a \sin\psi$, $F_q=F_a\cos\psi$. Здесь ψ — угол сдвига между током якоря I_1 и ЭДС $E_{\delta d}$, наведенной результирующим продольным потоком.

МДС обмотки возбуждения при нагрузке можно определить, используя векторную диаграмму Блонделя и частичные характеристики намагничивания машины.

При построении векторной диаграммы для определения ЭДС, наведенных полями реакции якоря, используют характеристику х. х. При этом МДС F_d и F_q обмотки статора заменяют эквивалентными по своему действию МДС $F_{ad}=k_{ad}F_d$ и $F_{aq}=k_{aq}F_q$ обмотки возбуждения, вводя коэффициенты k_{ad} и k_{aq}. Значения коэффициентов k_{ad} и k_{aq} в зависимости от величины полюсной дуги α при разных величинах и форме воздушного зазора δ (без учета насыщения) приведены в табл. 11-4.

Насыщение магнитной цепи уменьшает первую гармонику продольного поля. При определении F_{ad} и F_{aq} насыщение обычно учитывают приближенно введением поправочных коэффициентов $\varkappa_d$ и $\varkappa_q$, значения которых в зависимости от степени насыщения, выраженной отношением $F_{\delta зс}/F_\delta$ (при отношении зазоров $\delta''/\delta'=1{,}0\div2{,}0$), приведены на рис. 11-17.

Влияние поперечного поля на величину первой гармоники продольного поля равноценно действию добавочной МДС F_{qd}: при концентричном зазоре

$$F_{qd}=k_{qd}\frac{b_{н.п}}{\delta}F_a\cos\psi; \qquad (11\text{-}122)$$

при эксцентричном зазоре

$$F_{qd}=k_{qd}\frac{\tau}{\delta}F_a\cos\psi. \qquad (11\text{-}123)$$

Значения коэффициента k_{qd} приведены на рис. 11-17.

Продольная МДС, соответствующая продольной МДС реакции якоря с учетом поперечного поля, будет

$$F_{ad}' = F_{ad} + F_{qd}. \qquad (11\text{-}124)$$

Необходимая величина МДС обмотки возбуждения при нагрузке определяется суммой МДС $F_{\delta d}$, необходимой для создания про-

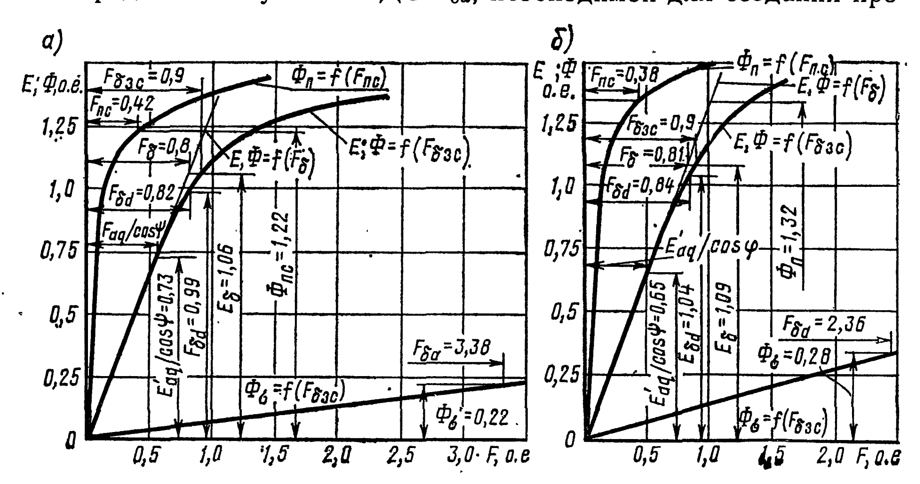


Рис. 11-18. Частичные характеристики намагничивания к примерам расчета: *а* — генератора; *б* — двигателя

дольного магнитного потока в воздушном зазоре (который в свою очередь наводит в обмотке статора ЭДС $E_{\delta d}$), продольной МДС F_{ad}' и МДС для роторных участков магнитной цепи $F_{пс}$.

Расчет МДС возбуждения при нагрузке. Режим нагрузки синхронной машины определяется фазным током I_1, фазным напряжением U_1 и коэффициентом мощности $\cos\varphi$. Для определения потока рассеяния полюсов при нагрузке используют частичные характеристики намагничивания (рис. 11-18) *: $\Phi_* = f(F_{\delta\,з.с*})$, $\Phi_{\sigma*} = f(F_{\delta\,з.с*})$ и $\Phi_{п*} = f(F_{п.с*})$.

Для заданного режима нагрузки (обычно номинального) строят векторную диаграмму Блонделя (в физических или в относительных единицах), начиная с вектора напряжения U_1, направляемого по оси ординат (рис. 11-19). При построении векторной диаграм-

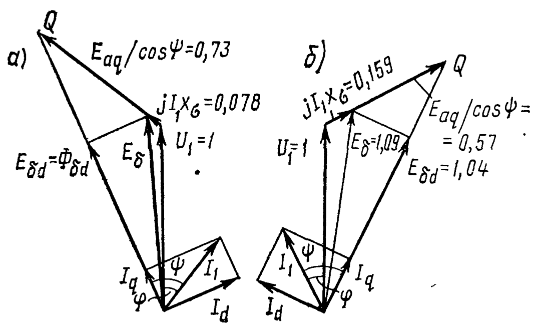


Рис. 11-19. Векторные диаграммы к примерам расчета:
а — генератора; *б* — двигателя

* На рис. 11—18 знак «*» опущен.

мы и частичных характеристик намагничивания в относительных единицах за базисные принимают значения магнитного потока Ф при номинальном фазном напряжении и соответствующие ему МДС обмотки возбуждения $F_{\Sigma(1)}$ и ЭДС $E_0 = U_{1н}$.

Под углом φ к U_1 в сторону опережения или отставания в зависимости от заданного характера нагрузки (см. рис. 11-19) строят вектор тока I_1. К вектору U_1 прибавляют вектор падения напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния статора $j\,Ix_\sigma$ и определяют ЭДС $E_{\delta d}$ от результирующего магнитного потока взаимоиндукции $\Phi_в$ в воздушном зазоре δ.

По частичной характеристике $\Phi = f(F_{\delta зс})$ (см. рис. 11-18) и прямой, являющейся продолжением прямолинейной части этой характеристики, для ЭДС E_δ, полученной из векторной диаграммы, определяют значения $F_{\delta зс}$ и F_δ, отношение которых $F_{\delta зс}/F_\delta$ приближенно выражает степень насыщения машины.

Для известных значений α, δ, δ''/δ', $F_{\delta зс}/F_\delta$ по кривым (см. рис. 11-18) и табл. 11-2 находят значения коэффициентов χ_d, χ_q, k_{qd}, k_{ad}, k_{aq}.

Амплитуда МДС реакции якоря

$$F_a = 0{,}45 m_1 w_1 k_{об1} I_1 k_{\Phi a}/p. \qquad (11\text{-}125)$$

При этом для явнополюсных машин обычного исполнения принимают коэффициент формы поля реакции якоря $k_{\Phi a} = 1$. При гребенчатой конструкции полюсных наконечников ротора $k_{\Phi a} = 1{,}0 \div 1{,}15$.

Для учета возможных технологических отклонений параметров магнитной цепи от расчетных полученное значение МДС возбуждения увеличивают на 10—20%.

Магнитную цепь при нагрузке рассчитывают в такой последовательности.

Строят частичные характеристики намагничивания: $\Phi = f(F_{\delta зс})$, $\Phi_\sigma = f(F_{\delta зс})$ $\Phi_п = f(F_{п2})$ (о. е.)	По форме табл. 11-2 и 11-3, рис. 11.18	
Строят векторную диаграмму Блонделя (о. е.) (рис. 11-19)	По форме рис. 11-19	
ЭДС, индуктированная магнитным потоком воздушного зазора (о. е.)	E_δ по векторной диаграмме рис. 11-19 (на рис. 11-19 знак «*» опущен)	
МДС для магнитной цепи воздушного зазора и статора (о. е.)	$F_{\delta зс}$ — по рис. 11-18	
МДС для воздушного зазора (о. е.)	F_δ — по рис. 11-18	
Предварительный коэффициент насыщения магнитной цепи статора	$k'_{нас} = F_{\delta зс}/F_\delta$	(11-126)
Поправочные коэффициенты, учитывающие насыщение магнитной цепи	$\varkappa_d$, $\varkappa_q$, k_{qd} — по рис. 11-17	
Коэффициенты реакции якоря	k_{ad}, k_{aq} — по табл. 11-4	
Коэффициент формы поля реакции якоря	$k_{\Phi a}$ — по § 11-8	
Амплитуда МДС обмотки статора (А)	F_a — по (11-125)	
То же, в относительных единицах	$F_{a*} = F_a/F_\Sigma$	(11-127)
Поперечная составляющая МДС реакции якоря, с учетом насыщения, отнесенная к обмотке возбуждения (о. е.)	$F_{aq*}/\cos\psi = \varkappa_q k_{aq} F_{a*}$	(11-128)

ЭДС обмотки статора, обусловленная действием МДС $F'_{aq}/\cos\psi$ (о. е.)	$E'_{aq*}/\cos\psi$ — по рис. 11-18
Направление вектора ЭДС $E_{\delta d}$, определяемое построением вектора $E_{aq}/\cos\psi$ на продолжении вектора jIx_{σ} (точка Q)	ψ, $\cos\psi$, $\sin\psi$ — по рис. 11-19
Продольная МДС реакции якоря с учетом влияния поперечного поля при концентричном зазоре	$F'_{ad*}=\varkappa_d k_{ad} F_{a*}\sin\psi + k_{qd} F_{a*}\cos\psi\cdot\tau\alpha'/\delta$ (11-129)
То же, при эксцентричном зазоре	$F'_{ad*}\approx\varkappa_d k_{ad} F_{a*}\sin\psi + k_{qd} F_{a*}\cos\psi\cdot\tau/\delta$ (11-130)
Продольная составляющая ЭДС, наводимая в обмотке статора результирующим потоком по продольной оси $\Phi_{\delta d}$, (о. е.)	$E_{\delta d}=\Phi_{\delta d}$ — по рис. 11-19
МДС по продольной оси, необходимая для создания ЭДС $E_{\delta d}$ (о. е.)	$F_{\delta d}$ — по рис. 11-18
Результирующая МДС по продольной оси (о. е.)	$F_{\delta a*}=F_{\delta d*}+F'_{ad*}$ (11-131)
Магнитный поток рассеяния при действии МДС $F_{\delta a}$ (о. е.).	Φ_{σ} — по рис. 11-18
Результирующий магнитный поток (о. е.)	$\Phi_{п*}=\Phi_{\delta d*}+\Phi_{\sigma*}$ (11-132)
МДС, необходимая для создания магнитного потока $\Phi_п$ (о. е.)	$F_{пс}$ — по рис. 11-18
МДС обмотки возбуждения при нагрузке (о. е.)	$F_{п.н*}=F_{\delta a*}+F_{пс*}$ (11-133)
То же (А)	$F_{п.н}=F_{2н*}F_{\Sigma(1)}$ **(11-134)**

Примеры расчета машин

7. Расчет магнитной цепи при нагрузке

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
306	По данным табл. 11-2 и 11-3 строим частичные характеристики намагничивания в о.е. (рис. 11-18) $\Phi=f(F_{\delta зс})$; $\Phi_п=f(F_{пс})$; $\Phi_{\sigma}=f(F_{\delta зс})$			
307	Строим векторные диаграммы Блонделя (рис. 11-19) по следующим исходным данным:			
			$U_1=1$; $I_1=1$ $\cos\varphi=0,8$ $\varphi=36,87°$ (отстающий) $x_{\sigma*}=0,078$	$U_1=1$; $I=1$; $\cos\varphi=0,9$ $\varphi=25,84$, (опережающий) $x_{\sigma*}=0,159$
308	E_{δ}, о.е.	рис. 11-19	1,06	1,09
309	F_{δ}, о.е.	рис. 11-18	0,8	0,81
310	$F_{\delta зс}$, о.е.	рис. 11-18	0,9	0,90
311	$k'_{нас}$	(11-126)	0,9/0,8=1,13	0,90/0,81=1,11
312	$\varkappa_d$, о.е.	рис. 11-17	0,95	0,97
313	$\varkappa_q$, о.е.	То же	0,67	0,80
314	k_{qd}	рис. 11-17	0,0036	0,0025
315	k_{ad}	табл. 11-4	0,85	0,87

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
316	k_{aq}	табл. 11-4	0,32	0,34
317	$k_{\Phi a}$	§ 11-8	1,05	1,0
318	F_a, А	(11-125)	0,45·3·70×0,89× ×54,1·1,05/2= =2388	0,45·3·360·0,94·45,5·1,0/4= =5196
319	F_{a*}, о.е.	(11-127)	2388/890=2,68	5196/2718=1,91
320	$F_{aq}/\cos\psi$, о. е.	(11-128)	0,67·0,32·2,68= =0,57	0,80·0,34·1,91=0,52
321	$E_{aq}/\cos\psi$, о.е.	рис. 11-18	0,73	0,65
322	ψ, град	рис. 11-19	61°	50°
323	$\cos\psi$	То же	0,48	0,64
324	$\sin\psi$	» »	0,87	0,76
325	F'_{ad*}, о.е.	(11-129)	0,95·0,85·2,68× ×0,87+0,0036× ×2,68·0,48× ×224,5·0,66/1= =2,56	—
326	F'_{ad}, о.е.	(11-130)	—	0,97·0,87·1,91·0,76+0,0025× ×1,91·0,64·247,3/2,5=1,52
327	$E_{\delta d}=\Phi_{\delta d}$, о.е.	рис. 11-19	0,99	1,04
328	$F_{\delta d}$, о.е.	рис. 11-18	0,82	0,84
329	$F_{\delta a*}$, о.е.	(11·131)	0,82+2,56=3,38	0,84+1,52=2,36
330	Φ_σ, о.е.	рис. 11-18	0,23	0,28
331	$\Phi_{н*}$, о.е.	(11-132)	0,99+0,23=1,22	1,04+0,28=1,32
332	$F_{пс}$, о.е.	рис. 11-18	0,42	0,38
333	$F_{п.н*}$, о.е.	(11-133)	3,38+0,42=3,8	2,36+0,38=2,74
334	$F_{п.н}$, А	(11-134)	3,8·890=3382	2,74·2718=7450

§ 11-9. Система возбуждения

Питание системы возбуждения современных явнополюсных синхронных машин с $h \leqslant 500$ мм осуществляется через статические выпрямительные регулирующие устройства от дополнительных обмоток, закладываемых в те же пазы статора, где расположена основная обмотка. В этом случае вопрос о напряжении возбуждения и параметрах обмотки возбуждения решается в комплексе с параметрами дополнительной обмотки статора.

В случае, когда дополнительную обмотку выполняют аналогично основной, напряжение на ее зажимах $U_д$ может быть рассчитано по соотношению витков $W_д$ и W_1. Напряжение на обмотку возбуждения подают через контактные кольца и металлографитные щетки марки МГ4. В связи с этим при нахождении напряжения воз-

буждения должно быть учтено падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ} \approx 2$ В.

Обмотку возбуждения явнополюсных синхронных машин выполняют так же, как и у машин постоянного тока, в виде катушек, размещаемых на сердечниках полюсов ротора. Полюсные катушки синхронных машин небольшой мощности ($h \leqslant 315$ мм) изготовляют многослойными из изолированного медного провода прямоугольного поперечного сечения, площадью не более 25 мм² (по технологическим соображениям), при предпочтительном соотношении сторон проводника в пределах 1,4—1,8. Провод наматывают на широкую сторону. Изоляцию обмотки ротора выполняют по приложению 23. При выборе марки провода следует руководствоваться табл. 10-14.

Многослойные катушки выполняют либо в виде ровных параллелепипедов, либо ступенчатой формы, которая дает возможность лучше использовать междуполюсное окно.

Площадь поперечного сечения проводника не должна быть менее 6,0 мм², иначе снижается заполнение катушки медью и ухудшается теплоотдача; по этой же причине не рекомендуется применять провода с круглым поперечным сечением. Если это условие не соблюдается, то следует перейти на более низкое напряжение возбуждения, с внесением необходимых изменений в параметры дополнительной обмотки статора.

В синхронных машинах большей мощности (при $h > 315$ мм) обмотки возбуждения изготовляют в виде однослойных катушек из неизолированного медного проводника, намотанного на ребро. Изоляцию обмотки выполняют по приложению 23. Крайние витки катушки выполняют с усиленной изоляцией, толщиной ~ 2 мм.

Проверка возможности размещения обмоток полюсов в междуполюсном окне состоит в расчете размеров катушек по ширине и высоте, с последующим вычерчиванием в масштабе эскиза междуполюсного окна.

В многослойных катушках из изолированных проводников прямоугольного поперечного сечения производят раскладку проводников, определяя их количество по ширине $N_{ш}$ и по высоте $N_{в}$.

В тех случаях, когда между соседними полюсами недостаточно места для размещения обмотки, однослойные катушки выполняют ступенчатыми из двух секций. Секцию катушки со стороны сердечника ротора выполняют из медной полосы меньшей ширины при равновеликой площади поперечного сечения проводника.

При определении размеров катушек следует иметь в виду, что при намотке и пропитке катушки разбухают. Это разбухание учитывают соответствующими коэффициентами, указанными в § 10-10.

При выборе формы и марки провода для полюсных катушек синхронных машин следует исходить из данных табл. 10-14. При определении размеров полюсных катушек учитывают толщину изоляции $b_{и}$ и необходимый зазор $b_{з}$ между изолированным сер-

дечником полюса и катушкой, двустороннее значение которых приведено ниже:

h, мм	80—200	215—315	355—450
$2(b_н + b_з)$, мм . . .	5	6	7

Форма полюсных катушек зависит также от размеров поперечного сечения сердечника полюса и провода. Многослойные полюсные катушки выполняют в соответствии с рис. 11-20,*а*. Однослойные катушки, намотанные из неизолированного медного провода на ребро, при $b_п \geqslant 200$ мм, тоже выполняют в соответствии с рис. 11-20,*а*, что обеспечивает минимальные допустимые радиусы закругления проводов, исключающие возникновение в них трещин при намотке; при $b_п < 200$ мм однослойные катушки

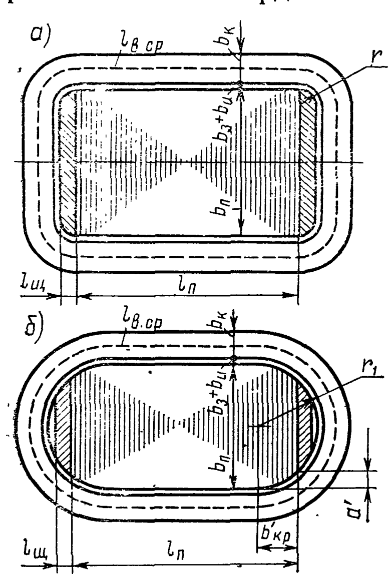


Рис. 11-20. Эскизы полюсных катушек:
а — однослойная при $b_п > 200$ мм и многослойная; *б* — однослойная при $b_п \leqslant 200$ мм

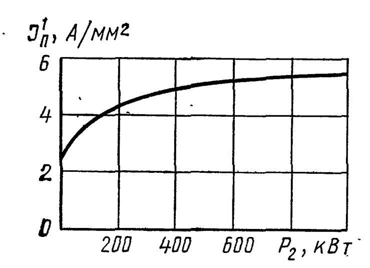


Рис. 11-21. Средние значения $J_п' = f(P_2)$

выполняют по рис. 11-20,*б*. При этом следует придерживаться соотношения:

$b_п$, мм	60	80	110	150	200
$b_{кр}$, мм	10	12,5	15	20	30

Обмотку возбуждения рассчитывают в такой последовательности.

Напряжение дополнительной обмотки статора (В) $$U_д = U_1 w_д / w_1 \quad (11\text{-}135)$$

Предварительная средняя длина витка обмотки возбуждения (мм) $$l'_{ср.п} = 2{,}5(l_п + b_п) \quad (11\text{-}136)$$

Предварительная площадь поперечного сечения проводника обмотки возбуждения (мм²) $$S' = \frac{1{,}15 m_т 2p F_{п.н} l'_{ср.п}}{57(U_д - 2)\cdot 10^3}. \quad (11\text{-}137)$$

Предварительная плотность тока в обмотке возбуждения (А/мм²) $J'_п$ — по рис. 11-21

Предварительное количество витков одной полюсной катушки $$w'_п = 1{,}15 F_{п.н}/(J'_п S') \quad (11\text{-}138)$$

Расстояние между катушками смежных полюсов (мм) $$a_к = \frac{l_п \tau}{h'_п \cdot 10^3} + a_{доп} \quad (11\text{-}139)$$

Многослойная полюсная катушка

Марка провода	По табл. 10-14	
Размеры проводника без изоляции (мм)	$a \times b$ — по приложению 2	
То же, с изоляцией	$a' \times b'$ — по приложению 3	
Площадь поперечного сечения проводника (мм²)	S — по приложению 2	
Предварительное наибольшее количество витков в одном слое	$N'_{в} = (h_{п} - h_{пр}) / (1{,}05b')$	(11-140)
Предварительное количество слоев обмотки по ширине полюсной катушки	$N'_{ш} = w'_{н} / N'_{в}$	(11-141)
Раскладка и уточнение числа витков катушки	$N_{в}$, $N_{ш}$, $w_{п}$ — по рис. 11-22,*а*	
Размер полюсной катушки по ширине (мм)	$b_{к.п} = 1{,}05 N_{ш} a'$	(11-142)
Размер полюсной катушки по высоте (мм)	$h_{к.п} = 1{,}05 N_{в} b'$	(11-143)
Средняя длина витка катушки (мм)	$l_{ср.п} = 2(l_{п} + b_{п}) + \pi [b_{к} + 2(b_{з} + b_{и})]$	(11-144)

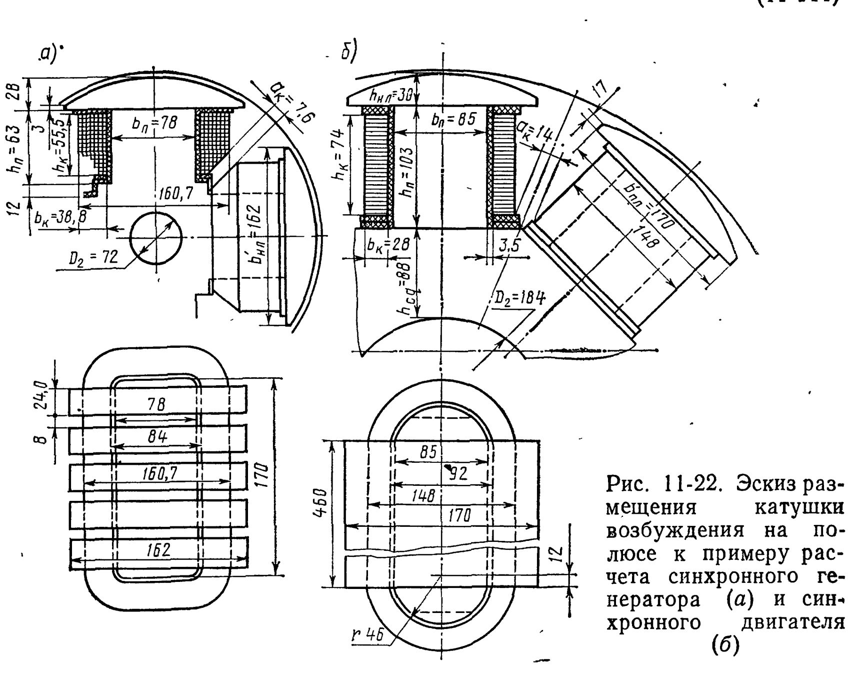


Рис. 11-22. Эскиз размещения катушки возбуждения на полюсе к примеру расчета синхронного генератора (*а*) и синхронного двигателя (*б*)

Однослойная полюсная катушка

Предварительный размер проводника обмотки из неизолированной полосовой меди, навиваемой на ребро, по ширине (мм)	$b' = \frac{\pi(D_1 - 2\delta' - 2h_{н.п} - 2h_{п}')}{4p} - 0{,}5 [b_{п} + 2(b_{з} + b_{и}) + a_{к}]$	(11-145)
То же, по толщине	$a = [h'_{п} - 2(b_{з} + b_{и}) - b_{пр}] / w_{п}$	(11-146)
Размеры проводника без изоляции (мм)	$a \times b$ — по приложению 2	
Площадь поперечного сечения проводника (мм²)	S — по приложению 2	

Минимальный допустимый радиус закругления проводника (мм)	$r_{min} > 0{,}05b^2/a$	(11-147)
Фактический средний радиус закругления проводника, навиваемого на ребро, по рис. 11-21,*б* (мм)	$r_1 = 0{,}5[b_п + 2(b_з + b_и)]$	(11-148)
То же, по рис. 11-21,*а*	$r_1 = l_щ + b_з + b_и$	(11-149)
Размер полюсной катушки по ширине (мм)	$b_{к.п} = b$ — по рис. 11-22,*б*	
Раскладка витков по высоте катушки	$N_в$ — по рис. 11-22,*б*	
Размер полюсной катушки по высоте (мм)	$h_{к\,п} = 1{,}03[N_в a + (N_в - 3)h_и + h'_и]$	(11-150)
Средняя длина витка катушки, выполненной по рис. 11-20,*б*	$l_{ср.п} = 2(l_п - 2b'_{кр}) + 2\pi(r_1 + b_{к.п})$	(11-151)
То же, выполненной по рис. 11-20,*а*	$l_{ср.п} = 2(l_п + b_п - r_1) + 2\pi(r_1 + b_{к.п})$	(11-152)
Ток возбуждения при номинальной нагрузке (А)	$I_{п.н} = F_{п.н}/w_п$	(11-153)
Уточненная плотность тока в обмотке возбуждения (А/мм²)	$J_п = I_{п.н}/(a_п S)$	(11-154)
Общая длина всех витков обмотки возбуждения (м)	$L_п = 2pw_п l_{ср.п} \cdot 10^{-3}$	(11-155)
Масса меди обмотки возбуждения (кг)	$m_{м.п} = \gamma_м \cdot 8{,}9 L_п S \cdot 10^{-3}$	(11-156)
Сопротивление обмотки возбуждения при температуре 20°С (Ом)	$r_п = L_п/(\rho_{м20} a_п S)$	(11-157)
Максимальный ток возбуждения (А)	$I_{п\,max} = U_п/(r_п m_т)$	(11-158)
Коэффициент запаса возбуждения	$I_{п\,max}/I_{п.н}$	(11-159)
Номинальная мощность возбуждения (Вт)	$P_п = U_п I_{п\,max}$	(11-160)

Здесь $h'_и = 2$ мм — высота усиленной изоляции крайних витков катушки; $a_п$ — количество параллельных ветвей в цепи обмотки возбуждения; $m_т$ — температурный коэффициент, принимаемый по табл. 4-1; наименьшее расстояние между катушками $a_{доп} = 7$, при $h \leqslant 280$ мм и $U_1 \leqslant 660$ В; $a_{доп} = 13$, при $U_1 = 6000$ В; $h_{пр}$ — толщина изолирующей шайбы из приложения 23; $U_п = U_д - 2$ — напряжение дополнительной обмотки за вычетом падения напряжения в щеточном контакте, равного 2 В; $\rho_{м20} = 57$ См/мкм — удельная электрическая проводимость меди при 20 °С.

Примеры расчета машин

8. Обмотка возбуждения

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
335	$U_д$, В	(11-135)	$400 \cdot 7/70 = 40$	$6000 \cdot 3/360 = 50$
336	$l'_{ср.п}$, мм	(11-136)	$2{,}5(170 + 78) = 620$	$2{,}5(460 + 85) = 1360$
337	S', мм²	(11-137)	$\frac{1{,}38 \cdot 4 \cdot 3382 \cdot 620}{(40-2)\,5 \cdot 10^4} = 6{,}1$	$\frac{1{,}38 \cdot 8 \cdot 7450 \cdot 1360}{(50-2)\,5 \cdot 10^4} = 46{,}6$
338	$J'_п$, А/мм²	рис. 11-21	3,5	5,0
339	$w'_п$	(11-138)	$\frac{1{,}15 \cdot 3282}{3{,}5 \cdot 6{,}1} = 183$	$\frac{1{,}15 \cdot 7450}{5 \cdot 46{,}6} = 37{,}7 \approx 38$
340	$a_к$, мм	(11-139), § 11-9	$\frac{170 \cdot 224{,}5}{63 \cdot 10^3} + 7 = 7{,}6$	$\frac{460 \cdot 247{,}3}{103 \cdot 10^3} + 13 = 14{,}0$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
341	—	§ 11-9, табл. 10-14 рис. 11-20	Принимаем медный провод ПЭТП-155 прямоугольного сечения с двусторонней толщиной изоляции 0,15 мм, катушка многослойная	Принимаем неизолированный ленточный медный провод. Изоляция между витками — асбестовая бумага толщиной 0,3 мм, катушка однослойная
342	$a \times b$, мм	приложение 2	$1{,}90 \times 3{,}15$	—
343	$a' \times b'$, мм	то же	$2{,}05 \times 3{,}3$	—
344	S, мм²	«	5,622	—
345	$N'_{в}$	(11-140)	$(63-2\cdot5)/(1{,}05\cdot3{,}3)=15{,}3$	—
346	$N'_{ш}$	(11-141)	$183/15{,}3=12$	—
347	$N_{ш}$	рис. 11-22	Всего 18 слоев 4 слоя по 16 витков 3 слоя по 13 витков 3 слоя по 10 витков 4 слоя по 8 витков 4 слоя по 6 витков	—
348	$N_{в}$	рис. 11-22	16	—
349	$w_{п}$	рис. 11-22	189	—
350	$b_{к.п}$, мм	(11-142)	$1{,}05\cdot18\cdot2{,}05=38{,}8$	—
351	$h_{к.п}$, мм	(11-143)	$1{,}05\cdot16\cdot3{,}3=55{,}5$	—
352	$l_{ср.п}$, мм	(11-144)	$2\,(170+78)+3{,}14\times[38{,}8+6]=650$	—
353	b, мм	(11-145)	—	$\frac{3{,}14\,(630-2\cdot2{,}2-2\cdot30-2\cdot103)}{4\cdot4}-0{,}5\,(85+7+14)=17{,}6$
354	a, мм	(11-146)	—	$(103-7-10)/38=2{,}3$
355	$a \times b$, мм	приложение 2	—	$1{,}56 \times 28$
356	S, мм²	то же	—	43,2
357	r_{min}, мм	(11-147)	—	$0{,}05\cdot28^2/1{,}56=25{,}1$
358	r_1, мм	(11-148)	—	$0{,}5\,(85+7)=46$
359	$b_{к.п}$, мм	рис. 11-22, *а*	—	28
360	$N_{в}=w_{п}$	рис. 11-22, *б*	—	38
361	$h_{к.п}$, мм	(11-150)	—	$1{,}03\,[38\cdot1{,}56+(38-3)\times0{,}3+2]=74$
362	$l_{ср.п}$, мм	(11-151)	—	$2(460-2\cdot13)+3{,}14\cdot2\cdot46+28)=1245$
363	$I_{п.н}$, А	(11-153)	$3382/189=17{,}9$	$7450/38=196$
364	$a_{п}$	§ 11-9	1	1
365	$J_{п}$, А/мм²	(11-154)	$17{,}9/(1\cdot5{,}622)=3{,}18$	$196/(1\cdot43{,}2)=4{,}55$
366	$L_{п}$, м	(11-155)	$4\cdot189\cdot650\cdot10^{-3}=492$	$8\cdot38\cdot1245\cdot10^{-3}=378$
367	$m_{м.п}$, кг	(11-156)	$8{,}9\cdot492\cdot5{,}622\cdot10^{-3}=27{,}7$	$8{,}9\cdot378\cdot43{,}2\cdot10^{-3}=146{,}0$
368	$r_{п}$, Ом	(11-157)	$492/(57\cdot1\cdot5{,}622)=1{,}367$	$378/(57\cdot1\cdot43{,}2)=0{,}154$
369	$I_{п\,max}$, А	(11-158)	$(40-2)/(1{,}367\cdot1{,}38)=20{,}2$	$(50-2)/(0{,}154\cdot1{,}38)=226$
370	$I_{п\,max}/I_{п.н}$	(11-159)	$20{,}2/17{,}9=1{,}13$	$226/196=1{,}15$
371	$P_{п}$, Вт	(11-160)	$(40-2)\,20{,}2=770$	$(50-2)\,226=10\,800$

§ 11-10. Параметры обмоток и постоянные времени

Под параметрами обмоток синхронных машин обычно понимают их активные и индуктивные сопротивления, выраженные в физических или относительных единицах.

Определение активных и индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора необходимо для расчета номинальных параметров и рабочих характеристик синхронной машины в установившихся симметричных и несимметричных режимах, а также переходных процессов.

Некоторые параметры обмоток для установившихся режимов уже были определены в § 11-7—11-9. Расчет других сопротивлений обмоток и постоянных времени производят в такой последовательности.

Сопротивления обмотки статора для установившегося режима

Коэффициент продольной реакции якоря	k_{ad} — по табл. 11-4	
Коэффициент насыщения при E=0,5	$k_{нас\,(0,5)} = 0{,}5F_\Sigma/(F_\delta + F_{п2})$	(11-161)
МДС для воздушного зазора при E=1,0 (о. е.)	$F_{\delta\,(1)}$ — по табл. 11-2 и 11-3	
Индуктивное сопротивление продольной реакции якоря (о. е.)	$x_{ad*} = k_{ad}F_a/(k_{нас\,0,5}F_{\delta\,(1)})$	(11-162)
Коэффициент поперечной реакции якоря	k_{aq} — по табл. 11-4	
Индуктивное сопротивление поперечной реакции якоря (о. е.)	$x_{aq*} = 0{,}5k_{aq}(1 + k_\delta)F_a/k_{нас\,(0,5)}F_{\delta\,(1)})$	(11-163)
Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси (о. е.)	$x_{d*} = x_{ad*} + x_{\sigma*}$.	(11-164)
Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси (о. е.)	$x_{q*} = x_{aq*} + x_{\sigma*}$	(11-165)

Сопротивления обмотки возбуждения

Активное сопротивление обмотки возбуждения, приведенное к обмотке статора, при рабочей температуре, соответствующей принятому классу нагревостойкости изоляции (о. е.)	$r_{п*} = \dfrac{3{,}6m_т F_{ан}k^2{}_{ad}l_{ср.п}}{10^6\Phi_f w_п S_в}$.	(11-166)
Коэффициент магнитной проводимости потоков рассеяния обмотки возбуждения	$\lambda_{п\Sigma} = \lambda_{н.п} + 0{,}65\lambda_{п.с} + 0{,}38\lambda_{пв}$	(11-167)
Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения (о. е.)	$x_{п*} = 1{,}27k_{ad}x_{ad*}\left(1 + \dfrac{4k_{нас\,(0,5)}F_\delta l_п \lambda_{п\Sigma}}{\Phi\cdot 10^{11}}\right)$	(11-168)
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения (о. е.)	$x_{п\sigma\,*} = x_{п*} - x_{ad*}$	(11-169)

Сопротивления демпферной (пусковой). обмотки

Относительное зубцовое деление демпферной обмотки (о. е)	$t_{2*} = \pi t_2/\tau$	(11-170)

Коэффициент распределения демпферной обмотки (углы выражены в радианах)	$k_{р2}=\sin(N_2 t_{2*})/(N_2 \sin t_{2*})$	(11-171)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния по зубцам полюсного наконечника	$\lambda_{дз} \approx t_2/(g_д \delta)$	(11-172)
Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния полюсов	$\lambda_{д.п}=\left(0{,}785-\dfrac{b_{ш2}}{2d_2}\right)+\dfrac{h_{ш2}}{b_{ш2}}$	(11-173)
Коэффициенты C_d и C_q	По рис. 11-23	
Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей демпферной обмотки по продольной оси	$\lambda_{длd} \approx 0{,}019\tau C_d/N_2$	(11-174)
То же, по поперечной оси	$\lambda_{длq} \approx 0{,}019\tau C_q/N_2$	(11-175)
Коэффициент магнитной проводимости рассеяния демпферной обмотки по продольной оси	$\lambda_{дd}=\dfrac{l_{нп}}{10N_2}(\lambda_{дп}+\lambda_{дз})+\lambda_{длd}$	(11-176)
То же, по поперечной оси	$\lambda_{дq}=\dfrac{l_{нп}}{10N_2}(\lambda_{дп}+\lambda_{дз})+\lambda_{длq}$	(11-177)
Индуктивное сопротивление полной демпферной обмотки по продольной оси (о. е.)	$x_{дd*}=\dfrac{3{,}9F_a\lambda_{дd}}{\Phi\cdot 10^8(1-k_{р2})}$	(11-178)
То же, по поперечной оси	$x_{дq*}=\dfrac{3{,}9F_a\lambda_{дq}}{\Phi\cdot 10^8(1+k_{р2})}$	(11-179)
Индуктивное сопротивление неполной демпферной обмотки по поперечной оси (о. е.)	$x_{дq*} \approx (3 \div 4)x_{дd*}$	(11-180)
Активное сопротивление стержней демпферной обмотки по продольной оси (о. е.)	$r_{cd*}=\dfrac{1{,}57\rho_{2(t)}l'_{ст}k_{ad}k_\delta \delta x_{ad*}}{(1-k_{р2})N_2 S l_п \mu_0 k_в \tau f_1}$	(11-181)
То же, по поперечной оси	$r_{cq*} \approx 0{,}75 r_{cd*}$	(11-182)
Активное сопротивление короткозамыкающих колец демпферной обмотки по продольной оси (о. е.)	$r_{кd*}=\dfrac{0{,}34\rho_{к(t)}N_2 t_2 k_{ad}}{(1-k_{р2})S_c l_п \mu_0}\dfrac{k_\delta \delta x_{ad*}}{k_B \tau f_1}$	(11-183)
То же, по поперечной оси	$r_{кq*} \approx 1{,}5 r_{кd*}$	(11-184)
Активное сопротивление полной демпферной обмотки по продольной оси (о. е.)	$r_{дd*}=r_{cd*}+r_{кd*}$	(11-185)
То же, по поперечной оси	$r_{дq*}=r_{cq*}+r_{кq*}$	(11-186)
Активное сопротивление неполной демпферной обмотки по поперечной оси (о. е.)	$r_{дq*}=(8 \div 12)r_{дd*}$	(11-187)

Здесь N_2 — количество стержней демпферной обмотки на полюс: коэффициент $g_д \approx 14$ при $\delta''/\delta'=1$; $g_д \approx 16{,}5$ при $\delta''/\delta'=1{,}5$; коэффициенты C_d и C_q находят из рис. 11-23, в зависимости от N_2 и t_2/τ; $\rho_{2(t)}$ и $\rho_{к(t)}$ — удельные значения сопротивления стержня и короткозамыкающего кольца (сегмента) при температуре $t=115\,°C$, соответствующей принятому классу нагревостойкости изоляции F (для меди $\rho_{2(115°)}=\rho_{к(115°)}=0{,}0242$); $k_в$ — коэффициент формы поля возбуждения, равный отношению амплитудного значения индукции основной волны поля к максимальному значению индукции этого поля

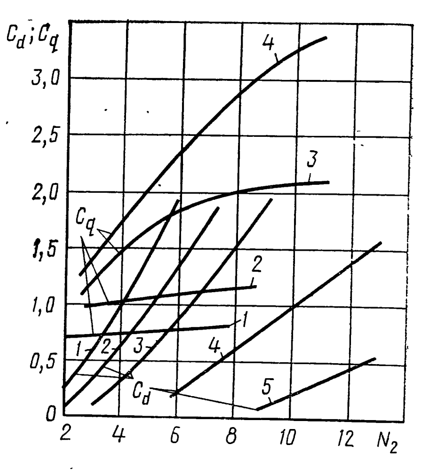


Рис. 11-23. Зависимость C_d и $C_q=f(N_2)$ при значениях $t_{з1}/\tau$, равных: 1 — 0,3; 2 — 0,2; 3 — 0,1; 4 — 0,05; 5 — 0,03

(табл. 11-5); при определении по (11-186) и (11-187) сопротивлений неполной демпферной обмотки большие значения коэффициентов берут при $N_2>6$ и $\alpha>0,7$; $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$ Г/м — магнитная проницаемость воздуха.

Таблица 11-5

α'	Коэффициент формы поля возбуждения $k_в$ при								
	δ''/δ'=1,0			δ''/δ'=1,5			δ''/δ'=2,0		
	δ/τ=0	0,01	0,03	δ/τ=0	0,01	0,03	δ/τ=0	0,01	0,03
0,5	0,90	0,96	1,00	0,80	0,084	0,88	0,72	0,76	0,80
0,6	1,03	1,08	1,11	0,92	0,95	0,98	0,83	0,85	0,88
0,7	1,13	1,16	1,18	1,01	1,03	1,05	0,92	0,95	0,97
0,8	1,21	1,22	1,23	1,08	1,10	1,10	1,00	1,01	1,02
0,9	1,25	1,26	1,26	1,13	1,14	1,14	1,06	1,07	1,07

Переходные и сверхпереходные сопротивления обмотки статора

Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси (о. е.)

$$x'_{d*}=x_{\sigma*}+\frac{x_{ad*}x_{п\sigma*}}{x_{ad*}+x_{пэ*}} \qquad (11\text{-}188)$$

То же, по поперечной оси

$$x'_{q*}\approx x_{q*} \qquad (11\text{-}189)$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси при наличии демпферной обмотки (о. е.)

$$x''_{d*}=x_{\sigma*}+\frac{x_{дd*}(x'_{d*}-x_{\sigma*})}{x_{дd*}+x'_{d*}-x_{\sigma*}} \qquad (11\text{-}190)$$

То же, по поперечной оси

$$x''_{q*}=x_{\sigma*}+\frac{x_{aq*}x_{дq*}}{x_{aq*}+x_{дq*}} \qquad (11\text{-}191)$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси при отсутствии демпферной обмотки, о. е.

$$x''_{d*}\approx x'_{d*} \qquad (11\text{-}192)$$

То же, по поперечной оси

$$x''_{q*}\approx x'_{q*}\approx x_{q*} \qquad (11\text{-}193)$$

Сопротивления для токов обратной и нулевой последовательности

Индуктивное сопротивление обмотки статора для токов обратной последовательности при работе машины на малое внешнее сопротивление (близкое к к. з.) (о. е.)

$$x_{2*}=\sqrt{x''_{d*}x''_{q*}} \qquad (11\text{-}194)$$

То же, при большом внешнем индуктивном сопротивлении (х. х.)

$$x_{2*}=0,5(x''_{d*}+x''_{q*}) \qquad (11\text{-}195)$$

Индуктивное сопротивление двухслойной обмотки статора для токов нулевой последовательности (о. е.)

$$x_{0*}\approx\frac{1,1l_1F_a}{10^9\Phi q_1k^2_{у1}}\left[(\beta-0,555)\times\frac{h_{п1}}{b_{п1}}+(3\beta-2)\frac{h_4}{b_{п1}}\right]+C\times\frac{F_a(3\beta-2)}{F_\delta k^2_{у1}}\left[0,39\left(\beta-\frac{2}{3}\right)-\left(\beta-\frac{2}{3}\right)^2+\left(\frac{1}{3q_1}\right)^2+0,037\right] \qquad (11\text{-}196)$$

Активное сопротивление обмотки фазы статора для тока нулевой последовательности при рабочей температуре (о. е.) $r_{0*} \approx r_{1*(20^\circ)} m_т$ (11-197)

Здесь $b_{п1}$ — ширина паза [при трапецеидальных пазах принимают $b_{п1}=0,5(b_1+b_2)$], мм; h_4 — высота верхней части паза, не занятая обмоткой; коэффициент $C=0,355$ (при наличии демпферной обмотки) и $C=0,71$ (при отсутствии демпферной обмотки).

Значения активных и индуктивных сопротивлений синхронных машин (выраженные в относительных единицах) обычно находятся в следующих пределах: $x_{\sigma*}=0,05\div0,2$; $r_{1*}=0,008\div0,08$; $x_{d*}=1,5\div2,9$; $x_{q*}=0,6\div1,6$; $x'_{d*}=0,2\div0,6$; $x''_{d*}=0,15\div0,3$; $x''_{q*}=0,15\div0,4$; $x_{2*}=0,15\div0,35$; $x_{0*}=0,02\div0,2$.

Постоянные времени

Обмотка возбуждения при разомкнутых обмотках статора и демпферной (с) $T_{d0}=x_{п*}/(\omega_1 r_{п*})$ (11-198)

То же, при замкнутой обмотке статора $T'_d=T_{d0}x'_{d*}/x_{d*}$ (11-199)

Демпферная обмотка при разомкнутых обмотках статора и возбуждения по продольной оси (с)

$$T_{дd0}=\frac{x_{ad*}+x_{дd*}}{\omega_1 r_{дd*}} \qquad (11\text{-}200)$$

То же, по поперечной оси

$$T_{дq0}=\frac{x_{aq}+x_{дq*}}{\omega_1 r_{дq*}} \qquad (11\text{-}201)$$

Демпферная обмотка по продольной оси при разомкнутой обмотке статора и замкнутой обмотке возбуждения (с)

$$T''_{d0}=\frac{x_{ad*}x_{п\sigma_*}+x_{дd*}(x_{ad*}+x_{п\sigma_*})}{\omega_1 r_{дd*}(x_{п\sigma_*}+x_{ad*})} \qquad (11\text{-}202)$$

То же, при короткозамкнутых обмотках возбуждения и статора $T''_d=T''_{d0}x''_{d*}/x'_{d*}$ (11-203)

Демпферная обмотка по поперечной оси при короткозамкнутой обмотке статора (с) $T''_q=T_{дq0}x''_{q*}/x_{q*}$ (11-204)

Обмотка статора при короткозамкнутых обмотках ротора $T_a=x_{2*}/(\omega r_{1*})$ (11-205)

Значения постоянных времени обмоток синхронных машин обычно находятся в следующих пределах: $T_{d0}=1\div10$ с; $T'_d=0,2\div2,5$ с; $T''_{d0}=0,01\div0,08$ с; $T_a=0,01\div0,5$ с; $T''_d=0,01\div0,08$ с; $T''_q=0,1\div0,5$ с.

9. Параметры обмоток и постоянные времени

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
	Сопротивления обмоток статора при установившемся режиме			
372	k_{ad}	табл. 11-4	0,85	0,87
373	$k_{нас(0,5)}$	(11-161)	$\frac{422}{340+52}=1,07$	$\frac{1264}{1025+109}=1,114$
374	$F_{\delta(1)}$, А	табл. 11-2	679	—
375	$F_{\delta(1)}$, А	табл. 11-3	—	2060
376	x_{ad*}, о. е.	(11-162)	$\frac{0,85\cdot2388}{1,07\cdot679}=2,79$	$\frac{0,87\cdot5196}{1,114\cdot2060}=1,97$
377	k_{aq}	табл. 11-4	0,32	0,34
378	x_{aq*}, о. е.	(11-163)	$0,5\cdot0,32(1+1,16)\times\frac{2388}{1,07\cdot679}=1,12$	$0,5\cdot0,34(1+1,32)\times\frac{5196}{1,114\cdot2060}=0,9$
379	x_{d*}, о. е.	(11-164)	$2,79+0,0787=2,868$	$1,97+0,159=2,129$
380	x_{q*}, о. е.	(11-165)	$1,12+0,0787=1,198$	$0,9+0,159=1,059$
	Сопротивления обмотки возбуждения			
381	$r_{п*}$, о. е.	(11-166)	$\frac{3,6\cdot1,38\cdot2388\cdot0,85^2}{10^6\cdot17,5\cdot10^{-3}\cdot50}\times\frac{650}{189\cdot5,622}=0,005$	$\frac{3,6\cdot1,38\cdot5196\times0,87^2\cdot1245}{10^6\cdot49,5\cdot10^{-3}\times50\cdot38\cdot43,2}=0,006$
382	$\lambda_{п\Sigma}$	(11-167)	$58,1+0,65\cdot74,5+0,38\times17,4=113,1$	$62,4+0,65\cdot62,9+0,38\times6,8=106$
383	$x_{п*}$, о. е.	(11-168)	$1,27\cdot0,85\cdot2,79\times\left(1+\frac{4\cdot1,07\cdot679}{17,5\cdot10^{-3}}\times\frac{170\cdot113,1}{10^{11}}\right)=3,11$	$1,27\cdot0,87\cdot1,97\left(1+\frac{4\cdot1,114\cdot2060\cdot460\cdot106}{49,5\cdot10^{-3}\cdot10^{11}}\right)=2,37$
384	$x_{п\sigma*}$, о. е.	(11-169)	$3,11-2,79=0,32$	$2,37-1,97=0,4$
	Сопротивления пусковой обмотки			
385	t_{2*}, о. е.	(11-170)	—	$3,14\cdot24,5/247,3=0,3$
386	$k_{р2}$	(11-171)		$\sin(7\cdot0,3)/(7\sin0,3)=0,44$
387	$\lambda_{дз}$	(11-172)		$24,5/(16,5\cdot2,5)=0,59$
388	$\lambda_{д.п}$	(11-173)		$\left(0,785-\frac{3}{2\cdot10,1}\right)+\frac{2}{3}=1,3$
389	C_d	рис. 11-23		1,2
390	C_q	рис. 11-23	—	1,9
391	$\lambda_{дл\,d}$	(11-174)	—	$0,019\cdot247,3\cdot1,2/7=0,805$
392	$\lambda_{дл\,q}$	(11-175)	—	$0,019\cdot247,3\cdot1,9/7=1,28$
393	$\lambda_{дd}$	(11-176)	—	$\frac{460}{10\cdot7}(1,3+0,59)+0,805=13,2$

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
394	$\lambda_{дq}$	(11-177)	—	$\frac{460}{10\cdot7}(1,3+0,59)+1,28=13,7$
395	$x_{дd*}$, о. е.	(11-178)	—	$\frac{3,9\cdot5196\cdot13,2}{49,5\cdot10^{-3}\times10^{8}(1-0,44)}=0,096$
396	$x_{дq*}$, о. е	(11-179)	—	$\frac{3,9\cdot5196\cdot13,7}{49,5\cdot10^{-3}\times10^{8}(1+0,44)}=0,039$
397	r_{cd*}, о. е.	(11-181)	—	$\frac{1,57\cdot0,0242\cdot495\cdot0,87\times1,32\cdot2,5}{(1-0,44)7\cdot78,5\cdot460\times4\cdot3,14\cdot10^{-7}}\times\frac{1,97}{1,01\cdot247,3\cdot50}=0,048$
398	r_{cq*}, о. е.	(11-182)	—	$0,75\cdot0,048=0,036$
399	$r_{кd*}$, о. е.	(11-183)	—	$\frac{0,34\cdot0,0242\cdot7\cdot24,5\times0,87\cdot1,32\cdot2,5}{(1-0,44)199,1\cdot460\times4\cdot3,14\cdot10^{-7}}\times\frac{1,97}{1,01\cdot247,3\cdot50}=0,01$
400	$r_{кq*}$, о. е.	(11-184)	—	$1,5\cdot0,01=0,015$
401	$r_{дd*}$, о. е.	(11-185)	—	$0,048+0,01=0,058$
402	$r_{дq*}$, о. е.	(11-186)	—	$0,036+0,015=0,051$
Переходные и сверхпереходные сопротивления обмотки статора				
403	x'_{d*}, о. е.	(11-188)	$0,0787+\frac{2,79\cdot0,32}{2,79+0,32}=0,36$	$0,159+\frac{1,97\cdot0,4}{1,97+0,4}=0,49$
404	x'_{q*}, о. е.	(11-189)	1,198	1,059
405	x''_{d*}, о. е.	(11-190)	—	$0,159+\frac{0,096(0,49-0,159)}{0,096+0,49-0,159}=0,233$
406	x''_{q*}, о. е.	(11-191)	—	$0,159+\frac{0,9\cdot0,039}{0,9+0,039}=0,196$
407	x''_{d*}, о. е.	(11-192)	0,36	—
408	x''_{q*}, о. е.	(11-193)	1,198	—
Сопротивления для токов обратной и нулевой последовательности				
409	x_{2*}, о. е.	(11-194)	$\sqrt{0,36\cdot1,198}=0,66$	$\sqrt{0,233\cdot0,196}=0,214$
410	x_{2*}, е. е.	(11-195)	$0,5(0,36+1,198)=0,78$	$0,5(0,233+0,196)=0,215$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
411	x_{0*}, о. е.	(11-196)	$\frac{1,1\cdot160\cdot2388}{10^9\cdot17,5\cdot10^{-3}\cdot3,5}\times\frac{1}{0,93^2}\left[(0,762-0,555)\times\frac{25}{14,2}+(3\cdot0,762-2)\times\frac{5}{14,2}\right]+0,71\times\frac{2388(3\cdot0\cdot762-2)}{679\cdot0,93^2}\times\left[0,39\left(0,762-\frac{2}{3}\right)-\left(0,762-\frac{2}{3}\right)^2+\left(\frac{1}{3\cdot3,5}\right)^2+0,037\right]=0,065$	$\frac{1,1\cdot445\cdot5196}{10^9\cdot49,5\cdot10^{-3}\cdot3\cdot0,98^2}\times\left[(0,89-0,555)\times\frac{65}{14,5}+(3\cdot0,89-2)\times\frac{8}{14,5}\right]+0,355\times\frac{5196(3\cdot0,89-2)}{2060\cdot0,98^2}\times\left[0,39\left(0,89-\frac{2}{3}\right)-\left(0,89-\frac{2}{3}\right)^2+\left(\frac{1}{3\cdot3}\right)^2+0,037\right]=0,11$
412	r_{0*}, о. е.	(11-197)	$0,0276\cdot1,38=0,038$	$0,0144\cdot1,38=0,0198$
		Постоянные времени обмоток		
413	T_{d0}, с	(11-198)	$3,11/(2\cdot3,14\cdot50\cdot0,005)=2,0$	$2,37/(2\cdot3,14\cdot50\times0,006)=1,25$
414	T'_d, с	(11-199)	$2,0\cdot0,36/2,868=0,2$	$1,25\cdot0,49/2,129=0,288$
415	$T_{\text{д}d0}$, с	(11-200)	—	$\frac{1,97+0,096}{2,3,14\cdot50\cdot0,058}=0,11$
416	$T_{\text{д}q0}$, с	(11-201)	—	$\frac{0,9+0,039}{2\pi\cdot50\cdot0,051}=0,06$
417	T''_{d0}, с	(11-202)	—	$\frac{1,97\cdot0,4+0,096\times(1,97+0,4)}{2\cdot3,14\cdot50\cdot0,058\times(0,4+1,97)}=0,04$
418	T''_d, с	(11-203)	—	$0,04\cdot0,233/0,49=0,019$
419	T''_q, с	(11-204)	—	$0,06\cdot0,196/1,129=0,01$
420	T_a, с	(11-205)	$0,78/(2\cdot3,14\cdot50\times0,0276)=0,09$	$0,214/(2\cdot3,14\cdot50\times0,0144)=0,047$

§ 11-11. Потери и КПД

Основные и добавочные потери в стали. Основные потери в стали вызываются основным магнитным потоком и возникают в спинке P_{c1} и зубцах $P_{з1}$ статора. Их определяют по методике, изложенной в § 9-9.

Добавочные потери х. х. в стали состоят главным образом из поверхностных потерь в полюсных наконечниках явнополюсных синхронных машин и вызываются колебаниями поля в их поверхностном слое из-за наличия пазов на статоре. Магнитное поле колеблется с частотой $f_з = z_1 n/60$. Эти потери зависят от амплитуды колебаний индукции B_0 (которая возрастает с уменьшением зазора δ и с увеличением открытия паза $b_ш$), частоты колебаний $f_з$, толщины листов (из которых собраны полюсные наконечники), их магнитной проницаемости и удельного сопротивления.

Амплитуда колебаний индукции (Тл)

$$B_0 = \beta_0 k_\delta B_\delta. \tag{11-206}$$

Здесь β_0 — коэффициент, зависящий от отношения $b_ш/\delta$:

Отношение $b_ш/\delta$	1	2	3	4	8	10	12	14
Коэффициент β_0	0,05	0,11	0,25	0,33	0,37	0,4	0,43	0,45

Среднее значение удельных поверхностных потерь (Вт/м^2), отнесенных к 1 м^2 поверхности полюсного наконечника,

$$p_{пов} = k_0 (z_1 n_1 \cdot 10^{-4})^{1,5} (0,1 B_0 t_1)^2. \tag{11-207}$$

Коэффициент k_0 выбирают следующим образом:

Марка стали	2013	2312	2411	Ст3	
Толщина листа, мм	0,5	0,5	0,5	1,0	2,0
Коэффициент k_0	1,8	1,4	1,4	4,5	7,2

Поверхностные потери машины (Вт)

$$P_{пов} = 2p\tau\alpha l_п p_{пов} k_п \cdot 10^{-6}, \tag{11-208}$$

где $k_п$ в зависимости от формы полюсного наконечника имеет следующие значения:

Отношение δ''/δ'	1	1,5	2,0
Коэффициент $k_п$	1	0,6	0,5

Основные электрические потери и потери на возбуждение. К основным электрическим потерям относят потери в обмотке статора (Вт)

$$P_{м1}' = m_1 I_1^2 r_1 m_т + m_1 (I'_{п.н}/\sqrt{3})^2 r_д m_т. \tag{11-209}$$

Потери на возбуждение синхронной машины складываются из потерь в обмотке возбуждения и потерь в щеточном контакте. Переходное падение напряжения в щеточном контакте принимают равным 2 В.

Добавочные потери при нагрузке. При нагрузке машины в стали и обмотке статора возникают добавочные потери, вызываемые главным образом полями рассеяния. Существующие методы расчета этих потерь сложны. Добавочные потери для синхронных машин мощностью до 1000 кВ·А согласно ГОСТ 11828—75 принимают равными 0,5% от полезной мощности (для генераторов) или от подводимой (для двигателей). При нагрузке, отличающейся от номинальной, указанные значения добавочных потерь пересчитывают пропорционально квадрату тока статора.

Механические потери. Включают в себя потери на трение в подшипниках, щеток о контактные кольца, вращающихся частей машины о воздух и на вентиляцию. Потери на трение в подшипниках и на вентиляцию (Вт) в наиболее распространенных машинах защищенного исполнения со способом охлаждения IC01 при отсутствии радиальных каналов

$$P'_{мх}=P_{т.п}+P_{вен}=8\left(\frac{n_1}{1000}\right)^2\left(\frac{D_1}{100}\right)^3; \qquad (11\text{-}210)$$

при наличи радиальных каналов

$$P'_{мх}=P_{т.п}+P_{вен}=0,8\,(n_п+10)\left(\frac{n_1}{1000}\right)^2\left(\frac{D_1}{100}\right)^3. \qquad (11\text{-}211)$$

Потери на трение щеток о контактные кольца (Вт)

$$P_{т.щ}=2,6I_{п.н}D_1n_1\cdot 10^{-6}. \qquad (11\text{-}212)$$

КПД при номинальной нагрузке. Потери и КПД синхронных машин рассчитывают в последовательности, изложенной в § 9-9, с учетом следующих формул.

Суммарные магнитные потери (Вт)	$P_{с\Sigma}=P_{с1}+P_{з1}+P_{пов}$	(11-213)
Потери на возбуждение синхронной машины при питании от дополнительной обмотки статора (Вт)	$P_п=I^2_{п.н}r_п+2I_{п.н}$	(11-214)
Добавочные потери в обмотке статора и стали магнитопровода при нагрузке:		
для генераторов (Вт)	$P_{доб}=0,005P_н$	(11-215)
для двигателей	$P_{доб}=0,005P_н/\eta'$	(11-216)
Механические потери (Вт)	$P_{мх}=P'_{мх}+P_{тщ}$	(11-217)
Суммарные потери (Вт)	$P_\Sigma=P_{с\Sigma}+P_{м1}+P_{доб}+P_п+P_{мх}$	(11-218)
КПД при номинальной нагрузке (%)	$\eta=[1-P_\Sigma/(P_{2н}+P_\Sigma)]\cdot 100$	(11-219)

10. Потери и КПД

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
421	$m_{з1}$, кг	(9-259)	$7,8\cdot42\cdot9,4\cdot25\cdot160\times$ $\times0,97\cdot10^{-6}=11,9$	—
422	$t_{з1max}$, мм	(9-128)	—	$3,14(630+2\cdot65)/72=$ $=33,14$
423	$b_{з1max}$, мм	(9-129)	—	$33,14-14,5=18,64$
424	$b_{з1ср}$, мм	(9-130)	—	$(13+18,64)/2=15,8$
425	$m_{з1}$, кг	(9-260)	—	$7,8\cdot72\cdot15,8\cdot65\cdot385\times$ $\times0,95\cdot10^{-6}=211$
426	$P_{з1}$, Вт	(9-250)	$4,4\cdot1,74^2\cdot11,9=160$	—
427	$P_{з1}$, Вт	(9-251)	—	$3,0\cdot1,52^2\cdot211=1440$
428	$m_{с1}$, кг	(9-251)	$7,8\cdot3,14(406-35)\cdot35\times$ $\times160\cdot0,97\cdot10^{-6}=50$	$7,8\cdot3,14(850-45)45\times$ $\times385\cdot0,95\cdot10^{-6}=325$
429	$P_{с1}$, Вт	(9-254)	$4,4\cdot1,61^2\cdot50=570$	—
430	$P_{с1}$, Вт	(9-255)	—	$3\cdot1,5^2\cdot325=2195$
431	B_0, Тл	(11-206)	$0,35\cdot1,16\cdot0,73=0,3$	$0,35\cdot1,32\cdot0,78=0,36$
432	$p_{пов}$, Вт/м²	(11-207)	$1,8(42\cdot1500\cdot10^{-4})^{1,5}\times$ $\times(0,1\cdot0,3\cdot21,4)^2=12$	$6(10^{-4}\cdot72\cdot750)^{1,5}\times$ $\times(0,1\cdot0,36\cdot27,5)^2=$ $=73,8$
433	$P_{пов}$, Вт	(11-208)	$2\cdot2\cdot224,5\cdot0,66\times170\times$ $\times12\cdot1\cdot10^{-6}=1,2$	$2\cdot4\cdot247,3\cdot0,66\cdot460\times$ $\times73,8\cdot0,6\cdot10^{-6}=26,6$
434	$P_{с\Sigma}$, Вт	(11-213)	$570+160+1,2=731$	$2195+1440+26,6=3660$
435	$P_{м1}$, Вт	(11-209)	$3\cdot54,1^2\cdot0,118\cdot1,38+$ $\times3(17,9/\sqrt{3})^2\cdot0,006\times$ $\times1,38=1433$	$3\cdot45,5\cdot1,099\cdot1,38+$ $+3(193/\sqrt{3})^2\cdot0,0023\times$ $\times1,38)=9540$
436	$P_п$, Вт	(11-214)	$17,9^2\cdot1,367\cdot1,38+2\times$ $\times17,9=640$	$19,6^2\cdot0,154\cdot1,38+2\times$ $\times196=8560$
437	$P_{доб}$, Вт	(11-215)	$0,005\cdot30\cdot10^3=150$	—
438	$P_{доб}$, Вт	(11-216)	—	$0,005\cdot400\cdot10^3/0,94=$ $=2130$
439	$P'_{мх}$, Вт	(11-210)	$8(1500\cdot10^{-3})^2\times(286\times$ $\times10^{-2})^3=420$	—
440	$P'_{мх}$, Вт	(11-211)	—	$0,8(7+10)(750\cdot10^{-3})^2\times$ $\times(630\cdot10^{-2})^3=1910$
441	$P_{т.щ}$, Вт	(11-212)	$2,6\cdot17,9\cdot286\cdot1500\times$ $\times10^{-6}=20$	$2,6\cdot193\cdot630\cdot750\cdot10^{-6}=$ $=240$
442	$P_{мх}$, Вт	(11-217)	$420+20=440$	$1910+240=2150$
443	P_Σ, Вт	(11-218)	$731+1433+150+640+$ $+440=3400$	$3660+9540+2130+$ $+8560+2150=26\,000$
444	η, %	(11-219)	$\left(1-\frac{3400}{30\cdot10^3+3400}\right)\times$ $\times100=89,8$	$\left(1-\frac{26\,000}{400\cdot10^3+26\,000}\right)\times$ $\times100=93,9$

§ 11-12. Характеристики машин

Изменение напряжения генератора. Повышение напряжения на зажимах генератора при переходе от режима с номинальной нагрузкой к х. х. при неизменных значениях тока возбуждения и частоты вращения выражают в процентах номинального напряжения:

$$\Delta U\% = \frac{U_{10} - U_{1н}}{U_{1н}} 100\%. \qquad (11\text{-}220)$$

Значение $\Delta U_{10} = E_0$ определяют по характеристике х. х. при номинальном значении МДС $F_{п.н}$ обмотки возбуждения, а $F_{п.н}$ — с помощью векторной диаграммы Блонделя.

Изменение напряжения синхронных явнополюсных генераторов мощностью до 1000 кВт в соответствии с ГОСТ 22407—77 не должно превышать 30%.

Регулировочные характеристики генератора. Для построения регулировочных характеристик, выражающих зависимость $I_п = f(I_1)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos\varphi = \text{const}$, задаются значениями тока статора от 0 до $1{,}2I_{1н}$ и с помощью векторной диаграммы определяют соответствующие токи возбуждения.

Внешние характеристики генератора. Эти характеристики, выражающие зависимость $U_1 = f(I_1)$ при $I_п = \text{const}$ и $\cos\varphi = \text{const}$, могут быть построены с помощью регулировочных характеристик. В частности, для построения внешней характеристики при $I_{п.н} = \text{const}$ и $\cos\varphi = \text{const}$ две крайние точки, соответствующие $U_{1н}$ при $I_1 = I_{1н}$ и U_0 при $I_1 = 0$, уже известны из предыдущих расчетов. Промежуточные точки находят по регулировочным характеристикам, построенным для значений напряжения $U_{1н} < U < U_0$.

U-образные характеристики. Эти характеристики, выражающие зависимость $I_1 = f(I_п)$ при постоянной мощности, могут быть определены при построении ряда векторных диаграмм Блонделя при $U = 1{,}0 = \text{const}$ и $I_1 \cos\varphi = \text{const}$, из которых для каждого значения тока I_1 определяют ток возбуждения $I_п$.

Угловые характеристики и статическая перегружаемость. Угловые характеристики синхронных машин выражают зависимость активной мощности от угла нагрузки θ при $U_1 = 1$ и $E_0 = \text{const}$. Под *углом нагрузки* θ понимают угол между магнитной осью полюса и осью результирующего магнитного поля статора или между векторами ЭДС E_0 и напряжения U_1. Приближенно, принимая параметры синхронной машины постоянными, угловую характеристику можно построить, задаваясь значениями угла $\theta = 0 \div \pi$ при $U_1 = 1$ по уравнению

$$P_* = \frac{E'_{0*}}{x_{d*}} \sin\theta + 0{,}5\left(\frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}}\right)\sin 2\theta. \qquad (11\text{-}221)$$

При этом ЭДС E'_{0*} определяют по продолжению прямолинейной части характеристики х. х. при токе возбуждения $I_{п.н*}$ (МДС $F_{п.н}$), соответствующем номинальной нагрузке машины.

По угловой характеристике определяют статическую перегружаемость синхронной машины. Под статической перегружаемостью понимают отношение максимального вращающего момента к номинальному. В соответствии с ГОСТ 183—74 этот показатель для синхронных двигателей при $\cos\varphi_н=0{,}9$ должен быть не менее 1,65.

Если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора и насыщением машины, что представляется допустимым для рассматриваемых синхронных машин, то статическую перегружаемость можно определить, пользуясь соотношениями

$$S=P_{max*}/P_{н*}=M_{max*}/M_{н*} \qquad (11\text{-}222)$$

или

$$S=E'_{0о*}k_р/x_{d*}\cos\varphi_н, \qquad (11\text{-}223)$$

где

$$E'_{0о*}=E'_{о*}I_{п.н*}; \qquad (11\text{-}224)$$

$k_р$ — коэффициент, учитывающий влияние реактивной мощности, связанной с различием индуктивных сопротивлений x_d и x_q; в зависимости от ε он имеет следующие значения:

ε, о. е. . .	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$k_р$.	1,0	1,02	1,02	1,04	1,07	1,10	1,14	1,17

При этом

$$\varepsilon=(x_{d*}-x_{q*})/(E'_{0о*}x_{q*}). \qquad (11\text{-}225)$$

Рабочие характеристики двигателей. Характеристики, выражающие зависимость P_{1*}, I_{1*}, $\cos\varphi$, η и M_* от полезной мощности P_2 при $U_{1*}=1=\text{const}$ и $I_{п.н*}=\text{const}$, можно получить, пользуясь U-образными характеристиками, построенными для ряда значений мощности P_{1*}, из которых при $I_п=I_{п.н}$ находят значения тока I_1, а затем определяют $\cos\varphi=P_1/(m_1U_1I_1)$; $P_2=P_1-P_\Sigma$; $\eta=P_2/P_1$; $M=P_2/\Omega_1$. Здесь P_Σ — суммарные потери в машине в рассматриваемом режиме работы; $\Omega_1=2\pi n/60$.

Отношение короткого замыкания. Важным показателем свойств синхронной машины является отношение короткого замыкания (ОКЗ), представляющее собой отношение тока возбуждения $I_{п0}$, соответствующего номинальному напряжению при х. х., к току возбуждения $I_{п.к}$, соответствующему номинальному току статора при его к. з., т. е.

$$\text{ОКЗ}=I_{по}/I_{п.к}. \qquad (11\text{-}226)$$

ОКЗ современных явнополюсных синхронных машин мощностью до 1000 кВт находится в пределах 0,45—0,85.

Увеличение воздушного зазора приводит к повышению ОКЗ и устойчивости работы синхронной машины при колебаниях нагрузки, но вместе с тем ведет к росту ее массы и снижению использования активных материалов.

Значение ОКЗ может быть определено по формуле

$$\text{ОКЗ}=E'_{о*}/x_{d*}. \qquad (11\text{-}227)$$

Значение $E'_{о*}$ (о. е.) определяют по прямолинейной характеристике, совпадающей с начальной прямолинейной частью характеристики х. х. при $I_{по}=1$; x_{d*} — ненасыщенное значение синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси (о. е.).

Токи короткого замыкания. Показателями, характеризующими работу синхронной машины в аварийных ситуациях при к. з., являются кратность тока к. з. при номинальном возбуждении и ударный ток к. з. Их используют при расчетах теплового и механического воздействия токов к. з. на обмотки статора и другие элементы конструкции синхронных машин.

Кратность установившегося тока к. з. определяется соотношением

$$I_{к}/I_{1н}=ОКЗ\,I_{п.н*}. \qquad (11\text{-}228)$$

Наибольшее мгновенное значение тока трехфазного короткого замыкания на выводах машины при напряжении х. х. $U_1=1{,}05U_{1н}$ называется ударным

$$i_{уд*}=I_{уд}/(\sqrt{2}I_{1н})\approx 1{,}89/x''_{d*}. \qquad (11\text{-}229)$$

Здесь $I_{п.н*}$ и x''_{d*} — выражены в относительных единицах, при этом $I_{п.н*}=F_{п.н*}$.

Пусковые характеристики двигателей. Пусковые свойства синхронного двигателя характеризуются начальным пусковым моментом (при $s=1$), входным моментом (при $s=0{,}05$) и начальным пусковым током статора. Эти показатели зависят от выбора конструктивных параметров и материала пусковой клетки. Увеличение сопротивлений пусковой клетки путем замены меди латунью приводит к повышению начального пускового момента и некоторому снижению входного момента.

В соответствии с ГОСТ 18200—79Е синхронные двигатели должны допускать прямой асинхронный пуск при номинальном напряжении сети. При этом отношение начального пускового момента к номинальному не должно быть меньше 0,8, а отношение начального пускового тока к номинальному не должно превышать 7,0.

Точный расчет пусковых характеристик связан со значительными трудностями, поэтому на практике применяют упрощенные методы, позволяющие получить приемлемые по точности результаты. Расчеты выполняют в относительных единицах с использованием комплексных чисел (для упрощения «звездочка» в формулах обычно применяемая для обозначения относительных величин, опущена).

Пусковые характеристики явнополюсных синхронных двигателей рассчитывают в такой последовательности (для значений скольжения $s=1{,}0$ и $s=0{,}05$).

Приведенное сопротивление обмотки возбуждения (о. е.)	$r'_{пс}=r_{п*}(1+k_r)/s$	(11-230)
Приведенное сопротивление демпферной обмотки: по продольной оси (о. е.)	$r_{дdc}=r_{дd}/s$	(11-231)
по поперечной оси	$r_{дqc}=r_{дq}/s$	(11-232)
Проводимость обмотки статора по продольной оси (о. е.)	$Y_{ad}=-j\dfrac{1}{x_{ad}}=-jb_{ad}$	(11-233)

Приведенная проводимость обмотки возбуждения (о. е.)

$$Y_{\text{пс}}=\frac{r'_{\text{пс}}-jx_{\text{п}\sigma}}{r'^{2}_{\text{пс}}+x^{2}_{\text{п}\sigma}}=g_{\text{пс}}-jb_{\text{пс}} \quad (11\text{-}234)$$

Приведенная проводимость успокоительной (пусковой) обмотки по продольной оси (о. е.)

$$Y_{\text{д}dc}=\frac{r_{\text{д}dc}-jx_{\text{д}d}}{r^{2}_{\text{д}dc}+x^{2}_{\text{д}d}}=g_{\text{д}dc}-jb_{\text{д}dc} \quad (11\text{-}235)$$

Полная приведенная проводимость по продольной оси (о. е.)

$$Y'_{dc}=Y_{ad}+Y_{\text{пс}}+Y_{\text{д}dc}=g_{dc}+jb_{dc} \quad (11\text{-}236)$$

Полное приведенное сопротивление по продольной оси (о. е.)

$$z_{dc}=jx_{\sigma}+\frac{g_{dc}+jb_{dc}}{g^{2}_{dc}+b^{2}_{dc}}=r_{dc}+jx_{dc} \quad (11\text{-}237)$$

Проводимость обмотки статора по поперечной оси (о. е.)

$$Y_{aq}=-j\frac{1}{x_{aq}}=-jb_{aq} \quad (11\text{-}238)$$

Приведенная проводимость пусковой обмотки по поперечной оси (о. е.)

$$Y_{\text{д}qc}=\frac{r_{\text{д}qc}-jx_{\text{д}q}}{r^{2}_{\text{д}qc}+x^{2}_{\text{д}q}}=g_{qc}-jb_{qc} \quad (11\text{-}239)$$

Полная приведенная проводимость по поперечной оси (о. е.)

$$Y_{qc}=Y_{aq}+Y_{\text{д}qc}=g'_{qc}+jb'_{qc} \quad (11\text{-}240)$$

Полное приведенное сопротивление по поперечной оси (о. е.)

$$Z_{qc}=jx_{\sigma}+\frac{g'_{qc}+jb'_{qc}}{(g'_{qc})^{2}+(b'_{qc})^{2}}=r_{qc}+jx_{qc} \quad (11\text{-}241)$$

Пусковой ток статора: прямого следования (о. е.)

$$I'=\frac{U}{2}\left(\frac{r_{dc}-jx_{dc}}{r^{2}_{dc}+x^{2}_{dc}}+\frac{r_{qc}-jx_{qc}}{r^{2}_{qc}+x^{2}_{qc}}\right)=\frac{U}{2}\left[(g_{dc}+g_{qc})-j(b_{dc}+b_{qc})\right] \quad (11\text{-}242)$$

обратного следования

$$I''=\frac{U}{2}\left(\frac{r_{qc}-jx_{qc}}{r^{2}_{qc}+x^{2}_{qc}}-\frac{r_{dc}-jx_{dc}}{r^{2}_{dc}+x^{2}_{dc}}\right)=\frac{U}{2}\left[(g_{qc}-g_{dc})-j(b_{qc}-b_{dc})\right] \quad (11\text{-}243)$$

Полный пусковой ток статора (о. е.)

$$I_{\text{пуск}}=\sqrt{(I')^{2}+(I'')^{2}} \quad (11\text{-}244)$$

Активная составляющая пускового тока статора прямого следования (о. е.)

$$I'_{1a}=\frac{U}{2}(g_{dc}+g_{qc}) \quad (11\text{-}245)$$

Пусковой момент (о. е.)

$$M_{\text{пуск}}=UI'_{1a}\frac{1}{\cos\varphi_{\text{н}}} \quad (11\text{-}246)$$

Здесь $k_r=8\div15$ — отношение добавочного сопротивления цепи возбуждения к сопротивлению обмотки возбуждения при пуске.

11. Характеристики машин

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
445	$\Delta U_н$. %	(11-220)	$\frac{1,2-1,0}{1,0}100=20$	—
446	ОКЗ, о. е.	(11-227)	$1,13/2,868=0,4$	$1,12/2,129=0,53$
447	$I_к/I_{1н}$, о. е.	(11-228)	$0,4\cdot 3,8=1,52$	$0,53\cdot 2,98=1,58$
448	$i_{уд*}$, о. е.	(11-229)	$1,89/0,36=5,3$	$1,89/0,233=8,1$
449	E'_{00*}, о. е.	(11-224)	$1,13\cdot 3,8=4,29$	$1,12\cdot 2,98=3,34$
450	ε	(11-225)	$\frac{2,868-1,198}{4,29\cdot 1,198}=0,32$	$\frac{2,129-1,129}{3,34\cdot 1,129}=0,26$
451	s, о. е.	(11-223)	$\frac{4,29\cdot 1,045}{2,868\cdot 0,8}=1,95$	$\frac{3,34\cdot 1,03}{2,129\cdot 0,9}=1,8$

Угловые характеристики

452	E'_{0*}, о. е.	рис. 11-15, *а*	4,2	—
453	E'_{0*}, о. е.	рис. 11-15, *б*	—	3,34
454	P_*, о. е.	(11-221)	$\frac{4,2}{2,868}\sin\theta+0,5\times\left(\frac{1}{1,198}-\frac{1}{2,868}\right)\times\sin 2\theta=1,46\sin\theta+0,24\sin 2\theta$	$\frac{3,34}{2,129}\sin\theta+0,5\times\left(\frac{1}{1,129}-\frac{1}{2,129}\right)\times\sin 2\theta=1,57\sin\theta+0,2\sin 2\theta$

По уравнениям (11-211) построены угловые характеристики, приведенные на рис. 11-24.

Пусковые характеристики при $s=1$

455	$r'_{пс}$, о. е.	(11-230)	—	$0,006(1+14)/1=0,09$
456	$r_{дdc}$, о. е.	(11-231)	—	$0,058/1=0,058$
457	$r_{дqc}$, о. е.	(11-232)	—	$0,051/1=0,051$

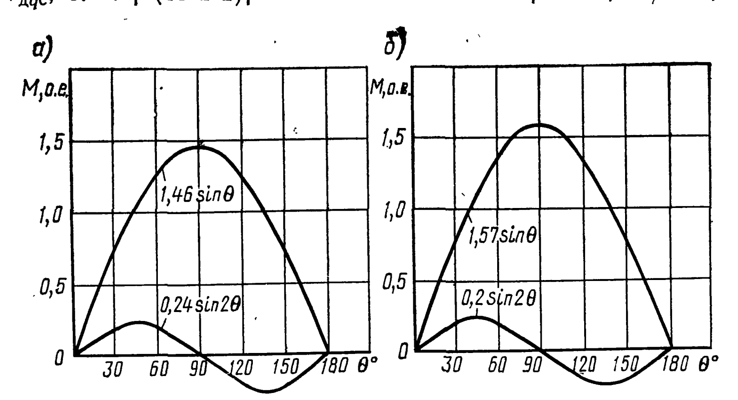


Рис. 11-24. Угловые характеристики генератора (*а*) и двигателя (*б*) к примерам расчета

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
458	Y_{ad}, о. е.	(11-233)	—	$-j\frac{1}{1,97}=-j0,51$
459	$Y_{пс}$, о. е.	(11-234)	—	$\frac{0,09-j0,4}{0,09^2+0,4^2}=$ $=0,535-j2,38$
460	$Y_{дdc}$, о. е.	(11-235)	—	$\frac{0,058-j0,096}{0,058^2+0,096^2}=$ $=4,61-j7,63$
461	Y'_{dc}, о. е.	(11-236)	—	$-j0,51+0,535-j2,38+$ $+4,61-j7,63=$ $=5,145-j10,52$
462	z_{dc}, о. е.	(11-237)	—	$j0,159+\frac{5,145-j10,52}{5,145^2+10,52^2}=$ $=0,037+j0,082$
463	Y_{aq}, о. е.	(11-238)	—	$-j\frac{1}{0,9}=-j1,11$
464	$Y_{дqc}$, о. е.	(11-239)	—	$\frac{0,051-j0,039}{0,051^2+0,039^2}=$ $=12,14-j9,28$
465	Y'_{qc}, о. е.	(11-240)	—	$-j1,11+12,14-j9,28=$ $=12,14-j10,39$
466	z_{qc}, о. е.	(11-241)	—	$j0,159+\frac{12,14-j10,39}{12,14^2+10,39^2}=$ $=0,047+j0,12$
467	I', о. е.	(11-242)	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{0,037+j0,082}{0,037^2+0,082^2}+\right.$ $\left.+\frac{0,047+j0,12}{0,047^2+0,12^2}\right)=$ $=1,15+j6,14$
468	I'', о. е.	(11-243)	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{0,037+j0,082}{0,037^2+0,082^2}-\right.$ $\left.-\frac{0,047+j0,12}{0,047^2+0,12^2}\right)=$ $=0,12+j1,98$
469	$I_{пуск}$, о. е.	(11-244)	—	$\sqrt{(1,15+j6,14)^2+}$ $\overline{+(0,12+j1,98)^2}=6,54$
470	I'_{1a}, о. е.	(11-245)	—	1,15
471	$M_{пуск}$, о. е.	(11-246)	—	$1\cdot 1,15/0,9=1,27$

Аналогично рассчитывают пусковые характеристики для $s=$ $=0,05$

§ 11-13. Тепловой и вентиляционный расчеты

Тепловой расчет синхронных машин. Расчет проводим по упрощенной методике, изложенной в § 5-3. Конструктивное подобие статора синхронных и асинхронных машин позволяет при тепловом расчете обмотки статора воспользоваться указаниями и методикой, изложенными в § 9-13, кроме формулы (9-378), которая позволяет определить потери в обмотке статора при максимальной допускаемой температуре, но без учета дополнительной обмотки. Потери в основной и дополнительной обмотках статора (Вт)

$$P'_{\text{м}1} = m_1 m'_{\text{т}} [I_1'^2 r_1 + (I_{\text{п.н}}/\sqrt{3})^2 r_{\text{д}}]. \qquad (11\text{-}247)$$

Следует также иметь в виду, что расчет потерь в обмотке ротора следует производить по (11-214), а потерями в демпферной обмотке, возникающими в результате пульсаций магнитного потока, а также при переходных режимах, можно пренебречь.

Тепловой расчет обмотки возбуждения производят аналогично тепловому расчету обмотки возбуждения добавочных полюсов машин постоянного тока в такой последовательности.

Условная поверхность охлаждения многослойных катушек из изолированных проводов (мм²)	$S_{\text{п}2}=2pl_{\text{ср.п}}\Pi_{\text{п}}$	(11-248)
То же, однослойных катушек обмотки из неизолированных проводов, намотанных на ребро (мм²)	$S_{\text{п}2}=2pl_{\text{ср.п}}h_{\text{к}}$	(11-249)
Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесенных к поверхности охлаждения обмотки (Вт/мм²)	$p_{\text{п}}=kP_{\text{п}}/S_{\text{п}2}$	(11-250)
Превышение температуры наружной поверхности охлаждения обмотки (°С)	$\Delta t_{\text{п.п}}=p_{\text{п}}/\alpha_{\text{т}}$	(11-251)
Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции многослойных катушек из изолированных проводов (°С)	$\Delta t_{\text{и.п}}=p_{\text{п}}\dfrac{b_{\text{и.п}}}{\lambda_{\text{экв}}}$	(11-252)
Среднее превышение температуры обмотки: над температурой воздуха внутри машины (°С)	$\Delta t_{\text{в}2}=\Delta t'_{\text{п}}+\Delta t_{\text{и.п}}$	(11-253)
над температурой наружного охлаждающего воздуха (°С)	$\Delta t_{\text{п}}=\Delta t'_{\text{п}}+\Delta t_{\text{в}}$	(11-254)

Здесь $\Pi_{\text{п}}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки, мм; $h_{\text{к}}$ — высота однослойной катушки, мм, $b_{\text{к.п}}$ — ширина катушки, значение которой определяют из эскиза размещения обмоток в междуполюсном окне, мм; k — из § 10-16; $\alpha_{\text{т}}$ — коэффициент теплоотдачи катушки:

Конструкция полюсной катушки . . .	однослойная	многослойная
Зависимость $\alpha_{\text{т}}=f(v_2)$, Вт/(мм² °С)	$\alpha_{\text{т}}=(3{,}0+0{,}42v_2)\times 10^{-5}$	$\alpha_{\text{т}}=(2{,}6+0{,}19v_2)\times 10^{-5}$

$b_{\text{и.п}}\approx 0{,}2$ мм — односторонняя толщина изоляции катушки; $\lambda_{\text{экв}}=16\times 10^{-5}$ Вт/(мм²·°С) — эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции (включая воздушные прослойки).

Среднее превышение температуры обмоток не должно быть больше допустимых значений для принятого класса нагревостойкости изоляционных материалов синхронной машины.

Вентиляционный расчет. Синхронные машины рассчитывают в соответствии с соображениями, изложенными в § 5-3. Эти машины выполняют самовентилируемыми при $h \leqslant 315$ мм — с аксиальной, а при $h > 315$ мм — с радиальной системой вентиляции.

В машинах небольшой мощности вентилятор насаживают непосредственно на вал, а при больших мощностях вентилирующие лопатки крепятся к ротору.

При аксиальной системе вентиляции с центробежным вентилятором расчет производят, как для машин постоянного тока. При этом значения эквивалентного аэродинамического сопротивления воздухопровода z_1 приведены ниже:

P_2/n_1, Вт/об/мин	3	5	10	25	100	250	1000	2×10^3	5×10^3	1×10^4
z_1, Па·с²/м	3000	1750	1100	500	150	80	25	10	4,5	2,3

В (10-382), (10-383) и (10-384) следует вместо D_1 подставлять значение наружного диаметра сердечника статора $D_{н1}$.

Расчет при радиальной системе вентиляции производят, как для асинхронных двигателей.

Примеры расчета машин

12. Тепловой и вентиляционный расчеты

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
			Тепловые расчеты	
			Обмотка статора	
472	$P'_{м1}$, Вт	(11-247)	$3\cdot1,48[54,1^2\cdot0,118+(17,9/\sqrt{3})^2\cdot0,006]=1535$	$3\cdot1,48[45,5^2\cdot1,099+(196/\sqrt{3})^2\cdot0,0042]=10\,390$
473	$P_п$, Вт	(11-214)	$17,9^2\cdot1,367\cdot1,48+2\times17,9=684$	$196^2\cdot0,154\cdot1,48+2\times196=9240$
474	$S_{п1}$, мм²	(9-379)	$3,14\cdot286\cdot160=1,44\cdot10^5$	$3,14\cdot630\cdot385=7,62\cdot10^5$
475	$П_1$, мм	(9-381)	$2,25+12,7+15,7=78,4$	—
476	$П_1$, мм	(9-381)	—	$2(65+14,5)=159$
477	$S_{мп1}$, мм²	(9-382)	$42\cdot78,4\cdot160=5,27\cdot10^5$	$72\cdot159\cdot445=50,94\cdot10^5$
478	$S_{л1}$, мм²	(9-383)	$4\cdot3,14\cdot286\cdot88=3,16\cdot10^5$	$4\cdot3,14\cdot630\cdot162=12,82\cdot10^5$
479	$S_{маш}$, мм²	(9-384)	$3,14\cdot406(160+2\cdot88)=4,26\cdot10^5$	$3,14\cdot850(445+2\cdot162)=20,3\cdot10^5$
480	$p_{п1}$, Вт/мм²	(9-386)	$\dfrac{0,84\left(1535\dfrac{2\cdot160}{890}+606\right)}{1,44\cdot10^5}=6,75\cdot10^{-3}$	$\dfrac{0,78\left(10\,390\dfrac{2\cdot445}{17\,760}+4297\right)}{7,62\times10^5}=9,73\cdot10^{-3}$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
481	$p_{\text{иш1}}$, Вт/мм²	(9-387)	$\dfrac{1535\cdot 2\cdot 160/890}{5,27\cdot 10^5}=1,05\cdot 10^{-3}$	$\dfrac{10\,390\cdot 2\cdot 445/1776}{50,94\cdot 10^5}=1\cdot 10^{-3}$
482	$p_{\text{л1}}$, Вт/мм²	(9-388)	$\dfrac{1535\cdot 2\cdot 284/890}{3,16\cdot 10^5}=3,1\cdot 10^{-3}$	$\dfrac{10\,390\cdot 2\cdot 445/1776}{12,82\cdot 10^5}=3,94\cdot 10^{-3}$
483	v_2, м/с	(9-389)	$\dfrac{3,14\cdot 284\cdot 1500}{60\,000}=22,3$	$\dfrac{3\cdot 14\cdot 625\cdot 750}{60\,000}=24,5$
484	$\Delta t_{\text{п1}}$, °C	(9-390)	$6,75\cdot 10^{-3}/(16\cdot 10^{-5})=42$	$9,73\cdot 10^{-3}/(14\cdot 10^{-5})=69,5$
485	$\Delta t_{\text{иш1}}$, °C	(9-391)	$1,05\cdot 10^{-3}\left(\dfrac{0,4}{16\cdot 10^{-5}}+\dfrac{(12,7+15,7)}{16\cdot 120\cdot 10^{-5}}\right)=4,2$	—
486	$b_{\text{и1}}$, мм	§ 9-13	—	$(14,5-2\cdot 4,75)/2=2,5$
487	$\Delta t_{\text{и.п1}}$, °C	(9-392)	—	$\dfrac{1\cdot 10^{-3}\cdot 2,5}{16\cdot 10^{-5}}=15,6$
488	$\Delta t_{\text{л1}}$, °C	(9-393)	$3,1\cdot 10^{-3}/(16\cdot 10^{-5})=20$	$3,94\cdot 10^{-3}/(14\cdot 10^{-3})=28$
489	$\Delta t_{\text{и.л1}}$, °C	(9-394)	$3,1\cdot 10^{-3}\left(\dfrac{0,4}{16\cdot 10^{-5}}+\dfrac{25}{12\cdot 120\cdot 10^{-5}}=13,1\right.$	—
490	$\Delta t_{\text{и.л1}}$, °C	(9-395)	—	$3,94\cdot 10^{-3}\cdot 2,5/(16\times 10^{-5})=61,6$
491	$\Delta t'_1$, °C	(9-396)	$(42+4,2)\dfrac{2\cdot 160}{890}+(20+13,1)\dfrac{2\cdot 282}{890}=37,6$	$(69,5+15,6)\dfrac{2\cdot 445}{1757}+(28+61,6)\dfrac{2\cdot 436}{1757}=88$
492	P'_{Σ}, Вт	(9-397)	$0,84\left(1535\dfrac{2\cdot 160}{890}+731\right)+1535\dfrac{2\cdot 282}{890}+722+441+150=3360$	$0,78\left(10\,390\dfrac{2\cdot 445}{1757}+3660\right)+10\,390\dfrac{2\cdot 433,5}{1757}+7227+2108+1800=23\,220$
493	$\Delta t_{\text{в}}$, °C	(9-399)	$3360/(4,26\cdot 10^5\cdot 125\times 10^{-5})=6,2$	$23\,220/(20,3\cdot 10^5\cdot 150\times 10^{-5})=7,6$
494	Δt_1, °C	(9-400)	$37,6+6,2=43,8$	$88+7,6=95,6$
			Обмотка возбуждения	
495	$S_{\text{п2}}$, мм	(11-248)	$4\cdot 623\cdot 53=13,2\cdot 10^4$	—
496	$S_{\text{п2}}$, мм²	(11-249)	—	$8\cdot 1226\cdot 74=72,5\cdot 10$
497	$P_{\text{п}}$, Вт/мм²	(11-250)	$0,9\cdot 684/(13,2\cdot 10^4)=47\cdot 10^{-4}$	$0,9\cdot 9240/(72,5\cdot 10^4)=115\cdot 10^{-4}$
498	$\alpha_{\text{т}}$, Вт/(мм²·°C)	§ 11-13	$(2,6+0,19\cdot 22,3)\cdot 10^{-5}=6,8\cdot 10^{-5}$	$(3,0+0,42\cdot 24,5)10^{-5}=13,3\cdot 10^{-5}$
499	$\Delta t_{\text{пп}}$, °C	(11-251)	$47\cdot 10^{-4}/(6,8\cdot 10^{-5})=69$	$115\cdot 10^{-4}/(13,3\cdot 10^{-5})=86,5$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
500	$\Delta t_{\text{ип}}$, °C	(11-252)	$47\cdot10^{-4}\cdot0{,}4/(16\cdot10^{-5})=$ $=12$	—
501	$\Delta t'_{\text{п}}$, °C	(11-253)	$69+12=81$	86,5
502	$\Delta t_{\text{п}}$, °C	(11-254)	$81+6{,}2=87$	$86{,}5+7{,}6=94$

Вентиляционный расчет. Принята система вентиляции:

			аксиальная	радиальная
503	$V_{\text{в}}$, м³/с	(5-28)	$3360/(1100\cdot2\cdot6{,}2)=0{,}24$	$23220/(1100\cdot2\cdot7{,}6)=$ $=1{,}37$
504	k_1	(5-40)	—	$3{,}5\sqrt[4]{\left(\frac{750}{1000}\right)^3}(6\cdot10+$ $+100)\cdot10^{-2}=4{,}5$
505	$V'_{\text{в}}$, м³/с	(5-39)	—	$4{,}5(625/100)^2\cdot10^{-2}=$ $=1{,}76$
506	H, Па	(5-41)	—	$7{,}85\left(\frac{750}{1000}\right)^2\left(\frac{625}{100}\right)^2=173$
507	Z_1, Па·с²/м²	§ 11-13	600	—
508	$D_{\text{вен2}}$, мм	(10-382)	$0{,}85\cdot406=345$	—
509	$D_{\text{вен1}}$, мм	(10-393)	$0{,}65\cdot406=265$	—
510	$l_{\text{л}}$, мм	(10-384)	$0{,}12\cdot406=50$	—
511	$N_{\text{л}}$	(10-385)	$345/20=17{,}25$	—
512	$N_{\text{л}}$	§ 10-16	17	—
513	$v_{\text{вен2}}$, м/с	(5-34)	$3{,}14\cdot345\cdot1500/(6\cdot10^4)=$ $=27$	—
514	$v_{\text{вен1}}$, м/с	(5-35)	$3{,}14\cdot265\cdot1500/(6\cdot10^4)=$ $=21$	—
515	H_0, Па	(5-33)	$0{,}6\cdot1{,}23(27^2-21^2)=212$	—
516	$S_{\text{вен}}$, м²	(5-37)	$0{,}92\cdot3{,}14\cdot345\cdot50\cdot10^{-6}=$ $=0{,}05$	—
517	$V_{\text{вmax}}$, м³/с	(5-36)	$0{,}42\cdot27\cdot0{,}05=0{,}57$	—
518	$V_{\text{в}}$, м³/с	(5-38)	$0{,}57\times\sqrt{\frac{212}{212+600\cdot0{,}57^2}}=$ $=0{,}4$	—
519	H, Па	(5-39)	$\frac{212\cdot600\cdot0{,}57^2}{212+600\cdot0{,}57^2}=102$	—

§ 11-14. Масса и динамические показатели

До разработки рабочих чертежей массу машины можно определить по приближенным формулам в такой последовательности:

Масса стали сердечника статора (кг) $m_{\text{с3}\Sigma}=m_{\text{з1}}+m_{\text{с1}}$ (11-255)

Масса стали полюсов (кг) $m_{\text{сп}}=7{,}8\cdot10^{-6}k_{\text{с}}l_{\text{п}}(b_{\text{п}}h'_{\text{п}}+k_{\text{к}}b_{\text{н.п}}h_{\text{н.п}})2p$ (11-256)

Масса стали сердечника ротора (кг) $m_{c2}=6{,}12k_c\cdot10^{-6}l_1[(2{,}05h_{c2}+D_2)^2-D_2]$ (11-257)

Суммарная масса активной стали статора и ротора (кг) $m_{c\Sigma}=m_{c3\Sigma}+m_{cп}+m_{c2}$ (11-258)

Масса меди обмотки статора (кг) $m_{м1}=8{,}9\cdot10^{-6}m_1(a_1w_1l_{cp1}S_0+a_д W_д l_{cp.д}s_{эф.д})$ (11-259)

Масса меди обмотки возбуждения (кг) $m_{м.п}$ — по (11-156)

Масса меди демпферной (пусковой) обмотки (кг) $m_{м.д}=8{,}9\cdot10^{-6}\cdot2p(N'_2sl'_{ст}+b'_{н.п}s_c+0{,}6s_cC_п)$ (11-260)

Суммарная масса меди (кг) $m_{м\Sigma}=m_{м1}+m_{м.п}+m_{м.д}$ (11-261)

Суммарная масса изоляции:

при $U\leqslant660$ В (кг) $m_и=(3{,}8D_{н1}^{1,5}+0{,}2D_{н1}l_1)10^{-4}$ (11-262)

при $U\geqslant6000$ В $m_и=(6{,}6D_{н1}^{1,5}+0{,}6D_{н1}l_1)10^{-4}$ (11-263)

Масса конструкционных материалов (кг) $m_к=AD_{н1}+B$ (11-264)

Масса машины (кг) $m_{маш}=m_{c\Sigma}+m_{м\Sigma}+m_и+m_к$ (11-265)

При $D_{н1}<520$ мм следует принимать $A=1{,}25$ и $B=-300$; при $D_{н1}\geqslant520$ мм $A=0{,}32$ и $B=400$; $k_к=0{,}8$ при традиционной и $k_к=0{,}7$ при гребенчатой конструкции полюсных наконечников; $C_п=2$ — количество перемычек демпферной обмотки на 1 пару полюсов.

Важным параметром синхронной машины является динамический момент инерции ротора $J_{и.д}$. Требования к $J_{и.д}$ определяются назначением и условиями работы синхронной машины. В машинах, предназначенных для работы в дизель-генераторных установках с широким изменением нагрузки, желательно иметь повышенный динамический момент инерции ротора, а в двигателях, предназначенных для работы в условиях частых пусков, динамический момент инерции ротора должен быть минимальным.

При расчете динамического момента инерции ротор синхронный машины разделяют на основные элементы и для каждого из них определяют значение $J_{и.д}$. Расчет выполняют так:

Радиус инерции полюсов с катушками (м) $R_{п.ср}=0{,}5[(0{,}5D^2_1+(0{,}85\div0{,}96)(0{,}5D_2+h_{c2})^2]\cdot10^{-6}$ (11-266)

Динамический момент инерции полюсов с катушками (кг/м²) $J_п=(m_{c.п}+m_{м.п}+m_{м.д})4R^2_{п.ср}$ (11-267)

Динамический момент инерции сердечника ротора (кг/м²) $J_{c2}=0{,}5m_{c2}\cdot10^{-6}[(0{,}5D_2+2h_{c2})^2-(0{,}5D_2)^2]$ (11-268)

Масса вала (кг) $m_в=15\cdot10^{-6}l_1D^2_2$ (11-269)

Динамический момент инерции вала (кг·м²) $J_в=0{,}5m_в0{,}5D^2_2\cdot10^{-6}$ (11-270)

Суммарный динамический момент инерции ротора (кг·м²) $J_{и.д}=J_п+J_{c2}+J_в$ (11-271)

Здесь c — коэффициент (для машин с демпферной обмоткой $c=0{,}85$; без демпферной обмотки $c=0{,}96$).

Для сравнения основных технических показателей спроектированных машин с показателями аналогичных отечественных машин можно воспользоваться данными, приведенными в каталогах.

Кроме того, может быть произведена общая оценка технического уровня спроектированных машин по обобщенному показателю Э, который рассчитывают в соответствии с материалами гл. 7.

13. Масса и динамический момент инерции

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
			Масса	
520	$m_{c1\Sigma}$, кг	(11-255)	11,9+50=61,9	211+325=536
521	$m_{сп}$, кг	(11-256)	7,8·10⁻⁶·0,97×170(78× ×65·0,7·162·28)4=42,4	7,8·10⁻⁶·0,98·460(85× ×103·0,8·170·30)8= =361
522	m_{c2}, кг	(11-257)	6,12·0,97·10⁻⁶× ×170[(2,05·13+72)²— —72²]=4,6	6,12·0,98·10⁻⁶·460× ×[(2,05·88+184)²— —184²]=273
523	$m_{c\Sigma}$, кг	(11-258)	61,9+42,4+4,6=108,9	536+361+273=1170
524	$m_{м1}$, кг	(11-259)	8,9·10⁻⁶·3(1·70× ×890·9,234+2·7·890× ×9,234)=18,4	8,9·10⁻⁶·3(1·360·1776× ×5,1+4·3·1776·5,1× ×2)=180
525	$m_{м.д}$, кг	(11-260)	—	8,9·10⁻⁶·8(7·78,5·495+ +170·199,1+1,2× ×0,5·199,1×2)=21,8
526	$m_{м\Sigma}$, кг	(11-261)	18,4+27,7=46	180+146+21,8=347,8
527	$m_{н}$, кг	(11-262)	(3,8·406^{1,5}+0,2·406× ×160)10⁻⁴=4,4	—
528	$m_{н}$, кг	(11-263)	—	(6,6·850^{1,5}+0,6·850× ×445)10⁻⁴=39
529	$m_{к}$, кг	(11-264)	1,25·406—300=207,5	0,32·850+400=672
530	$m_{маш}$, кг	(11-265)	109,9+46+4,4+207,5= =367	1172+348+39+672= =2230
			Динамический момент инерции ротора	
531	$R_{п.ср}$, м	(11-266)	0,5[(0,5·286)²+0,96× ×(0,5·72+13)²]·10⁻⁶= =0,0115	0,5[(0,5·630)²+0,85× ×(0,5·184+88)²]× ×10⁻⁶=0,063
532	$J_{п}$, кг·м²	(11-267)	(42,4+24,6)·0,0115= =0,77	(361+145+21,8)× ×0,063=33,47
533	J_{c2}, кг·м²	(11-268)	0,5·4,6·10⁻⁶](0,5× ×72+13)²+(0,5·72)²= =0,01	0,5·233,4·10⁻⁶[(0,5× ×184+88)²+(0,5× ×184)²=4,77
534	$m_{в}$, кг	(11-269)	15·10⁻⁶·160·72²=12,5	15·10⁻⁶·445·184²=226
535	$J_{в}$, кг·м²	(11-270)	0,5·12,5·10⁻⁶(0,5× ×72)²=0,01	0,5·226·10⁻⁶(0,5× ×184)²=0,96
536	$J_{и.д}$, кг·м²	(11-271)	0,77+0,01+0,01=0,79	33,47+4,77+0,96=39,2

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Диаметры и площади поперечного сечения круглых медных проводов

а) Провода марок ПЭТВ, ПЭТ-155, ПСД, ПСДК, ПСДТ, ПСДКТ

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Диаметр (мм) изолированного провода марки				Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Диаметр (мм) изолированного провода марки			
		ПЭТВ ПЭТ-155	ПСД ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ			ПЭТВ ПЭТ-155	ПСД ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ
0,06	0,00283	0,080	—	—	—	0,67	0,3530	0,730	0,93	0,87	0,84
0,07	0,00385	0,090	—	—	—	0,69	0,3740	0,750	0,95	0,89	0,86
0,08	0,00503	0,100	—	—	—	0,72	0,4070	0,780	0,99	0,94	0,90
0,09	0,00636	0,110	—	—	—	0,74	0,4300	0,805	1,01	0,96	0,92
0,10	0,00785	0,122	—	—	—	0,77	0,4660	0,835	1,04	0,99	0,95
0,11	0,00950	0,132	—	—	—	0,80	0,5030	0,865	1,07	1,02	0,98
0,12	0,01131	0,142	—	—	—	0,83	0,5410	0,895	1,10	1,05	1,01
0,13	0,01327	0,152	—	—	—	0,86	0,5810	0,925	1,13	1,08	1,04
0,14	0,01539	0,162	—	—	—	0,90	0,6360	0,965	1,17	1,12	1,08
0,15	0,01767	0,180	—	—	—	0,93	0,6790	0,995	1,20	1,15	1,11
0,16	0,0201	0,190	—	—	—	0,96	0,7240	1,025	1,23	1,18	1,14
0,17	0,0227	0,200	—	—	—	1,00	0,785	1,080	1,29	1,23	1,20
0,18	0,0255	0,210	—	—	—	1,04	0,849	1,120	1,33	1,27	1,24
0,19	0,0284	0,220	—	—	—	1,08	0,916	1,160	1,37	1,31	1,28
0,20	0,0314	0,230	—	—	—	1,12	0,985	1,200	1,41	1,35	1,32
0,21	0,0346	0,240	—	—	—	1,16	1,057	1,240	1,45	1,39	1,36
0,23	0,0415	0,265	—	—	—	1,20	1,131	1,280	1,49	1,43	1,40
0,25	0,0491	0,285	—	—	—	1,25	1,227	1,330	1,54	1,48	1,45
0,27	0,0573	0,305	—	—	—	1,30	1,327	1,385	1,59	1,53	1,50
0,29	0,0661	0,325	—	—	—	1,35	1,431	1,435	1,64	1,58	1,55
0,31	0,0755	0,345	0,55	0,50	0,46	1,40	1,539	1,485	1,69	1,63	1,60
0,33	0,0855	0,365	0,57	0,52	0,48	1,45	1,651	1,535	1,74	1,68	1,65
0,35	0,0962	0,390	0,59	0,54	0,50	1,50	1,767	1,585	1,79	1,73	1,70
0,38	0,1134	0,420	0,62	0,57	0,53	1,56	1,911	1,645	1,85	1,79	1,76
0,41	0,1320	0,450	0,65	0,60	0,56	1,62	2,060	1,705	1,91	1,87	1,86
0,44	0,1521	0,480	0,68	0,63	0,59	1,68	2,220	1,765	1,97	1,93	1,92
0,47	0,1735	0,510	0,71	0,66	0,62	1,74	2,380	1,825	2,03	1,99	1,98
0,49	0,1886	0,530	0,73	0,68	0,64	1,81	2,570	1,905	2,10	2,06	2,05
0,51	0,2040	0,565	0,77	0,71	0,68	1,88	2,780	1,975	2,17	2,13	2,12
0,53	0,2210	0,585	0,79	0,73	0,70	1,95	2,990	2,045	2,24	2,20	2,19
0,55	0,2380	0,605	0,81	0,75	0,72	2,02	3,200	2,115	2,32	2,28	2,27
0,57	0,2550	0,625	0,83	0,77	0,74	2,10	3,460	2,200	2,40	2,36	2,35
0,59	0,2730	0,645	0,85	0,79	0,76	2,26	4,010	2,360	2,62	—	—
0,62	0,3020	0,675	0,88	0,82	0,79	2,44	4,680	2,540	2,80	—	—
0,64	0,3220	0,700	0,90	0,84	0,81	2,63	5,430	—	2,99	—	—

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Диаметр (мм) изолированного провода марки				Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Диаметр (мм) изолированного провода марки			
		ПЭТВ ПЭТ-155	ПСД ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ			ПЭТВ ПЭТ-155	ПСД ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ
2,83	6,290	—	3,19	—	—	4,10	13,20	—	4,48	—	—
3,05	7,310	—	3,42	—	—	4,50	15,90	—	4,88	—	—
3,28	8,450	—	3,65	—	—	4,80	18,10	—	5,18	—	—
3,53	9,790	—	3,90	—	—	5,20	21,24	—	5,58	—	—
3,80	11,34	—	4,17	—	—						

б) Провода марки ПЭТ-200

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Диаметр изолированного провода марки ПЭТ-200, мм	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Диаметр изолированного провода марки ПЭТ-200, мм
0,50	0,196	0,552	1,25	1,227	1,325
0,56	0,246	0,612	1,32	1,368	1,395
0,63	0,312	0,690	1,40	1,539	1,485
0,71	0,396	0,770	1,50	1,767	1,585
0,75	0,442	0,810	1,60	2,011	1,685
0,80	0,503	0,865	1,70	2,270	1,785
0,85	0,567	0,915	1,80	2,545	1,895
0,90	0,636	0,965	1,90	2,835	1,995
0,95	0,709	1,015	2,00	3,142	2,095
1,00	0,785	1,080	2,12	3,530	2,215
1,06	0,882	1,135	2,24	3,941	2,345
1,12	0,985	1,195	2,36	4,374	2,465
1,18	1,094	1,255	2,50	4,909	2,605

Примечание. Диаметры изолированных проводов вычислены с учетом расчетной средней двусторонней толщины эмалевой изоляции, принимаемой как округленное среднее арифметическое из минимальной и максимальной толщин.

П р и л о ж е н и е 2. **Размеры и площади поперечного течения проволоки прямоугольной, лент и шин медных**

Номинальный размер проволоки по большей стороне, мм	Номинальный размер прозолоки по меньшей стороне (мм) для следующих расчетных площадей поперечного сечения проволоки a, мм²																				
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,0	2,12	2,24	2,36
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	1,559	—	1,734	—	1,905	—	2,160	—	2,435	—	2,753	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	—	—	—	—	—	—	—
2,36	1,751	—	1,950	—	2,145	—	2,429	—	2,735	—	3,089	—	3,561	—	—	—	—	—	—	—
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—	—	—
2,65	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—	—	—
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—	—	—
3,00	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,985	—	4,585	—	5,038	—	6,638	—	—	—
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315	6,693	—
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—	7,141	—
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163	7,589	7,829
3,75	2,863	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—	8,037	—
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117	8,597	8,891
4,25	3,263	—	3,651	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,287	—	8,137	—	9,157	—
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177	9,717	10,07
4,75	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—	10,28	—
5,00	3,863	4,095	4,326	4,566	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24	10,84	11,25
5,30	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—	6,410	—	7,205	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—	11,51	—
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51	12,18	12,67
6,00	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—	7,285	—	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—	13,08	—
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99	13,75	14,32
6,70	—	—	5,856	—	6,485	—	7,289	—	8,160	—	9,165	—	10,51	—	11,70	—	13,04	—	14,65	—
7,10	—	—	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69	15,54	16,21
7,50	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—	9,160	—	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—	16,44	—
8,00	—	—	—	—	7,785	8,265	8,745	9,255	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60	17,56	18,33
8,50	—	—	—	—	—	—	9,305	—	10,41	—	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—	18,68	—
9,00	—	—	—	—	—	—	9,865	10,41	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72	19,80	20,69
9,50	—	—	—	—	—	—	—	—	11,66	—	13,09	—	15,99	—	16,74	—	18,64	—	20,92	—
10,00	—	—	—	—	—	—	—	—	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84	22,04	23,05
10,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—	23,38	—
11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,47	16,59	17,71	18,68	19,80	20,92	22,04	23,38	24,73	25,88
11,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,67	—	20,88	—	23,24	—	26,07	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14	27,64	28,95

П р и м е ч а н и е. Прямоугольную проволоку используют для изготовления изолированных проводов.

Номинальный размер проволоки по большей стороне, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне (мм) для следующих расчетных площадей поперечного сечения прозолоки *a*, *мм*														
	2,50	2,65	2,80	3,0	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
3,55	8,326	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,75	8,826	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,00	9,451	10,65	10,85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	10,08	—	11,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,50	10,70	11,38	12,05	12,95	13,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	11,33	—	12,75	—	14,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,00	11,95	12,70	13,45	14,45	15,20	16,20	17,20	—	—	—	—	—	—	—	—
5,30	12,70	—	14,29	—	16,15	—	18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
5,60	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	—	—	—	—	—	—
6,00	14,45	—	16,25	—	18,35	—	20,75	—	23,14	—	—	—	—	—	—
6,30	15,20	16,15	17,09	18,35	19,30	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—
6,70	16,20	—	18,21	—	20,56	—	23,24	—	25,94	—	29,29	—	—	—	—
7,10	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—
7,50	18,20	—	20,45	—	23,08	—	26,08	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
8,00	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,50	20,70	—	23,25	—	26,23	—	29,63	—	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74
9,00	21,95	23,30	24,65	26,45	27,80	29,60	31,40	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,50	23,20	—	26,05	—	29,38	—	33,18	—	37,14	—	41,89	—	46,64	—	52,34
10,00	24,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,6	25,95	—	29,13	—	32,84	—	37,08	—	41,54	—	46,84	—	52,14	—	58,50
11,2	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86
11,8	28,95	—	32,49	—	36,62	—	41,34	—	46,34	—	52,24	—	52,14	—	65,22
12,5	30,70	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Номинальный размер лент на большей стороне *b*, мм	Расчетные сечения лент (мм²) при следующих номинальных размерах лент по меньшей стороне *a*, мм																	
	1,25	1,35	1,45	1,50	1,56	1,68	1,81	1,95	2,00	2,10	2,26	2,44	2,50	2,63	2,83	3,00	3,28	3,53
11,6	14,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	15,3	16,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	16,5	17,8	19,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	17,9	19,2	20,6	—	22,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	19,2	20,7	22,2	—	23,8	25,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,0	—	—	—	23,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,8	20,7	22,3	23,9	—	25,7	27,6	29,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18,0	22,2	23,9	25,7	—	27,6	29,6	31,9	34,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19,5	24,0	25,9	27,9	—	29,9	32,2	34,6	37,2	—	40,6	—	—	—	—	—	—	—	—
20,0	—	—	—	29,5	—	—	—	—	39,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22,0	27,2	29,3	31,5	—	33,8	36,4	39,1	42,1	—	45,3	48,6	52,4	—	—	—	—	—	—
25,0	30,9	33,4	35,8	37,0	38,5	41,4	44,6	47,9	49,1	51,6	55,4	59,7	61,2	64,3	—	—	—	—
26,3	32,5	35,1	37,7	—	40,5	43,6	46,9	50,5	—	54,3	58,3	62,8	—	67,7	72,7	—	—	—
28,0	34,7	37,4	40,2	—	43,2	46,4	50,0	53,8	—	57,9	62,2	67,0	—	72,2	77,5	82,1	—	—
30,0	37,2	40,1	43,1	44,5	46,3	49,8	53,6	57,7	59,1	62,1	66,7	71,9	73,7	77,4	83,2	88,1	96,1	—
32,0	39,7	42,8	46,0	—	49,4	53,2	57,2	61,6	—	66,3	71,3	76,8	—	82,7	88,9	94,1	102,7	110,3
35,0	43,4	46,9	50,3	—	54,1	58,2	62,7	67,4	—	72,6	78,0	84,1	—	90,6	97,4	103,1	112,5	120,9
40,0	49,7	53,6	57,6	59,5	61,9	66,6	71,7	77,2	79,1	83,1	89,3	96,3	98,7	103,7	111,5	118,1	128,9	138,5
45,0	55,9	60,4	64,8	—	69,7	75,0	80,8	86,9	—	93,6	100,6	108,5	—	116,9	125,7	133,1	145,3	156,2
47,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	114,4	—	122,1	—	—	—	—
50,0	62,2	67,1	72,1	74,5	77,5	83,4	89,8	96,7	99,1	104,1	111,9	120,7	123,7	130,0	139,8	148,1	161,7	173,8
55,0	—	—	—	—	85,3	91,8	98,9	106,4	—	114,6	123,2	132,9	—	143,2	154,0	163,1	178,1	191,5
60,0	74,7	80,6	86,6	—	93,1	100,2	107,9	116,2	—	125,1	134,5	145,1	—	156,3	168,1	178,1	194,5	209,1
65,0	—	—	—	—	100,9	—	—	125,9	—	—	—	157,3	—	169,5	182,3	193,1	210,8	226,8
70,0	—	—	—	—	108,7	—	—	135,7	—	—	—	169,5	—	—	—	208,1	227,3	244,4
80,0	—	—	—	—	124,3	—	—	155,2	—	—	—	193,9	—	—	—	238,1	—	—
90,0	—	—	—	—	139,9	—	—	174,7	—	—	—	218,3	—	—	—	268,1	—	—
100,0	—	—	—	—	155,5	—	—	194,2	—	—	—	242,7	—	—	—	298,1	—	—

Номинальный размер шин по большей стороне b, мм	Расчетные сечения шин (мм²) при следующих номинальных размерах шин по меньшей стороне a, мм									
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10,0
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	198,1
25	—	—	—	—	—	—	—	198,1	223,1	248,1
30	—	—	—	—	179,1	193,1	208,1	238,1	268,1	298,1
32	—	—	—	—	191,1	206,1	—	—	—	—
35	—	—	174,1	191,6	209,1	225,6	—	278,1	—	348,1
40	159,5	179,1	199,1	219,1	239,1	258,1	278,1	318,1	358,1	398,1
45	179,5	201,6	224,1	246,6	269,1	290,6	313,1	358,1	403,1	448,1
50	199,5	224,1	249,1	274,1	299,1	323,1	348,1	398,1	448,1	498,1
55	219,5	246,6	274,1	301,6	329,1	355,6	383,1	438,1	493,1	548,1
60	239,5	269,1	299,1	329,1	359,1	388,1	418,1	478,1	538,1	598,1
65	259,5	291,6	324,1	—	389,1	—	453,1	—	583,1	648,1
70	279,5	314,1	349,1	—	—	—	—	558,1	628,1	698,1
75	—	—	—	—	—	—	—	598,1	—	—
80	319,5	359,1	399,1	—	479,1	—	558,1	638,1	—	798,1
90	359,5	404,1	449,1	—	539,1	—	628,1	718,1	—	898,1
100	399,5	449,1	499,1	—	599,1	—	698,1	798,1	—	998,1
120	—	—	—	—	—	—	—	958,1	—	1198,1

Приложение 3. Двусторонняя толщина изоляции обмоточных проводов прямоугольного поперечного сечения

Марка провода	Номинальные размеры проводов по меньшей стороне, мм			Номинальные размеры проводов по большей стороне, мм						
	От 0,90 до 2,00	От 2,10 до 3,80	От 4,0 до 5,6	От 2,10 до 2,50	От 2,63 до 3,35	От 3,53 до 4,50	От 4,70 до 5,60	От 5,90 до 7,10	От 7,40 до 8,00	От 8,50 до 12,50
ПСДКТ	0,22	0,22	—	0,26	0,28	0,28	0,30	0,30	0,32	0,32
ПСДК и ПСД	0,27	0,33	0,4	0,32	0,36	0,39	0,42	0,44	0,46	0,48

Примечание. Двусторонняя толщина изоляции проводов марок ПЭТВП, ПЭТП-155 и ПЭТП-200—0,15 мм.

Приложение 4. Размеры и площади поперечного сечения шин прямоугольных (прессованных) из алюминия

Номинальный размер шины по меньшей стороне, мм	Площадь поперечного сечения шины (мм²) при номинальном размере по большей стороне, мм			
	30	40	50	60
4	120	160	200	240
5	150	200	250	300
6	180	240	300	360

Алюминий марки АДО с удельным сопротивлением не более 0,029 Ом·мм²/м при 20 °С, плотность материала 2,71 г/см³.

Приложение. 5. Основная таблица намагничивания. Сталь 2013

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,56	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62
0,5	0,63	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69
0,6	0,70	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,74	0,75	0,76	0,77
0,7	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87
0,8	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97
0,9	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
1,0	1,0	1,11	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23
1,1	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,32	1,33	1,34	1,36	1,38
1,2	1,41	1,46	1,52	1,58	1,64	1,70	1,76	1,82	1,88	1,94
1,3	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,9
1,4	3,00	3,20	3,50	3,80	4,10	4,30	4,60	5,00	5,40	5,8
1,5	6,20	6,70	7,80	8,90	10,0	11,3	12,4	13,5	14,6	15,8
1,6	17,0	18,6	20,2	21,8	23,4	25,0	27,0	28,0	30,0	32,0
1,7	34,0	37,0	40,0	43,0	47,0	50,0	54,0	58,0	62,0	66,0
1,8	70,0	75,0	80,0	85,0	92,0	100	106	112	118	124
1,9	130	136	142	148	156	165	173	181	189	198
2,0	207	226	244	263	281	300	360	420	480	540
2,1	600	670	740	810	880	950	1020	1090	1160	1230
2,2	1300	1380	1460	1540	1620	1700	1780	1860	1940	2020
2,3	2100	2180	2260	2340	2420	2500	2580	2660	2740	2820
2,4	2900	2980	3060	3140	3220	3300	3380	3460	3540	3620

Приложение 6. Основная таблица намагничивания. Сталь 2312

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/см									
0,4	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,73	0,74	0,75	0,75
0,5	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
0,6	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95
0,7	0,96	0,99	1,03	1,08	1,13	1,18	1,22	1,26	1,31	1,35
0,8	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85
0,9	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35
1,0	2,40	2,46	2,52	2,58	2,64	2,70	2,76	2,82	2,88	2,94
1,1	3,00	3,10	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60	3,70	3,80	3,90
1,2	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,60	4,70	4,80	5,00	5,20
1,3	5,50	5,80	6,10	6,50	6,90	7,30	7,80	8,30	8,80	9,40
1,4	10,0	10,6	11,2	11,8	12,4	13,0	13,6	14,2	14,8	15,4
1,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0	23,5	25,0	27,0	29,0	31,0
1,6	34,0	36,0	38,0	41,0	44,0	47,0	53,0	59,0	65,0	71,0
1,7	77,0	82,0	89,0	94,0	100	106	111	117	122	128
1,8	134	140	146	152	158	164	170	176	182	188
1,9	194	200	218	237	257	278	300	322	344	366
2,0	388	410	434	460	480	521	557	597	641	689
2,1	740	800	860	920	980	1050	1120	1200	1280	1360
2,2	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760

Приложение. 7. Основная таблица намагничивания. Сталь 2411

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/см									
0,4	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76
0,5	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,89
0,6	0,90	0,92	0,94	0,96	0,97	0,99	1,01	1,03	1,05	1,07
0,7	1,09	1,11	1,13	1,15	1,17	1,19	1,22	1,24	1,27	1,30
0,8	1,33	1,35	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50	1,54	1,58	1,62
0,9	1,66	1,70	1,74	1,79	1,84	1,87	1,94	1,99	2,05	2,11
1,0	2,17	2,23	2,30	2,37	2,44	2,52	2,60	2,69	2,77	2,86
1,1	2,95	3,04	3,14	3,24	3,34	3,44	3,55	3,66	3,77	3,88
1,2	3,99	4,11	4,23	4,35	4,47	4,60	4,73	4,86	5,00	5,40
1,3	5,85	6,30	6,80	7,35	7,95	8,60	9,30	10,0	10,7	11,5
1,4	12,3	13,2	14,2	15,2	16,3	17,5	18,7	20,1	21,6	23,2
1,5	25,0	26,8	28,7	30,8	33,0	35,4	38,0	40,9	43,8	47,0
1,6	50,0	53,8	57,6	62,0	66,5	71,2	76,5	82,0	88,0	94,0
1,7	100	105	110	115	120	125	131	137	143	149
1,8	156	162	168	175	183	191	200	209	219	229
1,9	239	250	262	274	287	300	320	360	420	500
2,0	590	680	770	860	950	1040	1130	1220	1310	1400
2,1	1490	1580	1670	1760	1850	1940	2030	2120	2210	2300
2,2	2390	2480	2570	2660	2750	2840	2930	3020	3110	3200
2,3	3290	3380	3470	3560	3650	3740	3830	3920	4010	4100
2,4	4190	4280	4370	4460	4550	4640	4730	4820	4910	5000

Приложение 8. **Таблица намагничивания для зубцов машин переменного тока. Сталь 2013**

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	1,24	1,27	1,3	1,33	1,36	1,38	1,41	1,44	1,47	1,5
0,5	1,54	1,57	1,6	1,64	1,67	1,71	1,74	1,77	1,8	1,84
0,6	1,88	1,91	1,94	1,98	2,01	2,05	2,08	2,12	2,16	2,24
0,7	2,23	2,26	2,29	2,33	2,36	2,4	2,43	2,47	2,50	2,53
0,8	2,56	2,59	2,62	2,65	2,68	2,71	2,74	2,77	2,80	2,83
0,9	2,86	2,90	2,93	2,97	3,01	3,04	3,08	3,12	3,16	3,20
1,0	3,24	3,29	3,33	3,38	3,42	3,46	3,50	3,55	3,60	3,65
1,1	3,70	3,75	3,80	3,85	3,91	3,96	4,01	4,06	4,11	4,17
1,2	4,24	4,30	4,36	4,42	4,48	4,55	4,61	4,67	4,73	4,79
1,3	4,86	4,95	5,04	5,14	5,24	5,33	5,63	5,74	5,84	5,95
1,4	5,86	5,98	6,10	6,22	6,34	6,46	6,58	6,70	6,83	6,96
1,5	7,09	7,22	7,35	7,49	7,63	7,77	7,91	8,05	8,20	8,35
1,6	8,5	8,78	9,06	9,34	9,62	9,90	10,2	10,5	10,8	11,1
1,7	11,5	11,8	12,2	12,5	12,9	13,3	13,6	14,0	14,4	14,8
1,8	15,2	15,7	16,2	16,7	17,2	17,7	18,3	18,9	19,5	20,1
1,9	20,7	21,6	22,5	23,4	24,3	25,2	26,4	27,6	28,9	30,2
2,0	31,5	33,2	35,0	36,8	38,6	40,4	42,6	44,8	47,0	49,2
2,1	51,4	54,4	57,4	60,5	63,6	66,7	71,2	75,7	80,2	84,7
2,2	89,2	94,3	99,4	104,6	109,8	115	120	126	132	138
2,3	144	151	158	165	172	180	188	196	205	214

Приложение. 9. **Таблица намагничивания для зубцов машин переменного тока. Сталь 2312**

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,71
0,5	1,74	1,77	1,80	1,84	1,86	1,90	1,92	1,96	1,98	2,02
0,6	2,04	2,09	2,13	2,16	2,21	2,24	2,29	2,33	2,37	2,41
0,7	2,45	2,49	2,53	2,57	2,62	2,67	2,72	2,77	2,82	2,87
0,8	2,92	2,97	3,02	3,06	3,11	3,16	3,22	3,26	3,31	3,37
0,9	3,42	3,47	3,53	3,60	3,66	3,72	3,79	3,84	3,90	3,96
1,0	4,03	4,09	4,17	4,25	4,33	4,40	4,50	4,60	4,70	4,77
1,1	4,88	4,97	5,09	5,17	5,27	5,37	5,47	5,59	5,70	5,82
1,2	5,93	6,02	6,13	6,26	6,38	6,51	6,63	6,77	6,95	7,10
1,3	7,24	7,38	7,55	7,70	7,90	8,04	8,20	8,40	8,57	8,79
1,4	8,97	9,17	9,36	9,55	9,77	10,0	10,2	10,4	10,6	10,9
1,5	11,2	11,5	11,7	12,1	12,4	12,7	13,1	13,3	13,7	14,1
1,6	14,5	14,9	15,3	15,6	16,1	16,5	16,9	17,5	17,9	18,4
1,7	19,0	19,4	20,0	20,7	21,4	22,2	23,0	23,8	25,0	26,0
1,8	27,0	28,0	29,2	30,5	32,2	33,3	34,9	36,1	37,1	40,0
1,9	41,6	43,6	46,0	48,0	50,3	53,3	54,3	57,9	61,3	64,2
2,0	67,5	71,7	74,0	77,9	81,5	85,2	90,0	94,0	97,5	102
2,1	106	110	115	121	126	130	135	141	147	154
2,2	159	165	173	178	185	191	196	203	211	220
2,3	231	243	255	268	281	295	309	324	339	364

Приложение. 10. Кривая намагничивания для зубцов машин переменного тока. Сталь 2411

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,72	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82
0,5	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92
0,6	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,04
0,7	1,05	1,06	1,08	1,10	1,11	1,13	1,15	1,17	1,18	1,20
0,8	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	1,32	1,34	1,36	1,38	1,40
0,9	1,42	1,44	1,47	1,49	1,51	1,55	1,8	1,60	1,63	1,65
1,0	1,68	1,71	1,75	1,77	1,80	1,84	1,88	1,91	1,96	2,00
1,1	2,04	2,07	2,12	2,16	2,22	2,27	2,32	2,37	2,42	2,47
1,2	2,54	2,59	2,65	2,72	2,77	2,84	2,91	2,98	3,07	3,16
1,3	3,23	3,33	3,41	3,51	3,61	3,72	3,83	3,94	4,04	4,21
1,4	4,25	4,32	4,61	4,80	4,97	5,18	5,37	5,54	5,73	5,96
1,5	6,22	6,44	6,73	7,00	7,28	7,56	7,95	8,28	8,59	8,90
1,6	9,32	9,76	10,2	10,7	11,3	11,8	12,6	13,5	14,4	15,2
1,7	16,3	17,4	18,7	20,2	21,3	23,0	24,5	26,3	28,3	30,4
1,8	31,9	34,1	35,9	38,3	41,0	44,0	46,0	48,0	51,0	54,0
1,9	57,0	59,0	63,0	66,0	69,0	72,0	77,0	81,0	83,0	87,0
2,0	92,0	97,0	100	105	109	114	120	127	131	137
2,1	142	150	158	165	172	179	187	198	206	216
2,2	226	237	246	261	269	287	300	314	332	354
2,3	376	399	422	446	470	495	520	546	572	598

Приложение 11. Таблица намагничивания для спинки машин переменного тока. Сталь 2013

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,58	0,59	0,60	0,61	0,62
0,5	0,64	0,65	0,66	0,67	0,69	0,71	0,72	0,74	0,76	0,78
0,6	0,80	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97
0,7	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08	1,11	1,13	1,15	1,18	1,21
0,8	1,24	1,26	1,29	1,32	1,35	1,38	1,40	1,43	1,46	1,49
0,9	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,68	1,71	1,74	1,77	1,81
1,0	1,85	1,88	1,91	1,95	1,99	2,03	2,06	2,09	2,13	2,17
1,1	2,21	2,25	2,29	2,33	2,37	2,41	2,45	2,49	2,53	2,57
1,2	2,62	2,67	2,72	2,77	2,83	2,89	2,95	3,01	3,07	3,13
1,3	3,20	3,27	3,34	3,41	3,49	3,57	3,65	3,73	3,82	3,91
1,4	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,50	4,64	4,78	4,92	5,06
1,5	5,20	5,42	5,64	5,86	6,08	6,30	6,54	6,78	7,02	7,26
1,6	7,50	7,88	8,26	8,64	9,02	9,40	9,82	10,2	10,7	11,1
1,7	11,5	12,2	12,9	13,6	14,3	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
1,8	20,0	21,6	23,2	24,9	26,5	28,1	29,6	31,1	32,7	34,2
1,9	35,7	38,0	40,3	42,6	44,9	47,2	49,3	51,4	53,5	55,6
2,0	57,7	60,0	63,0	66,0	70,0	74,0	79,0	84,0	90,0	97,0

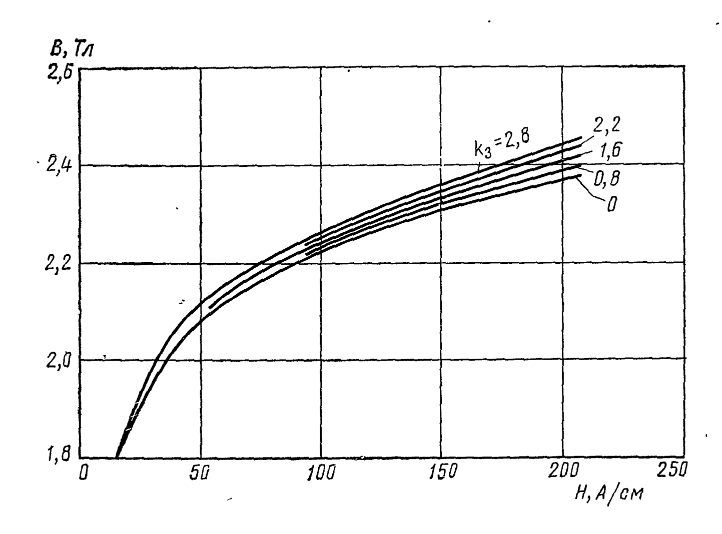
Приложение 12. **Таблица намагничивания для спинки машин переменного тока. Сталь 2312**

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,06
0,5	1,08	1,10	1,13	1,15	1,18	1,20	1,22	1,24	1,26	1,28
0,6	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,47	1,50	1,53	1,56
0,7	1,59	1,62	1,66	1,69	1,72	1,76	1,80	1,83	1,86	1,90
0,8	1,94	1,98	2,01	2,04	2,08	2,12	2,16	2,20	2,23	2,27
0,9	2,31	2,35	2,39	2,43	2,48	2,52	2,55	2,60	2,65	2,69
1,0	2,74	2,79	2,84	2,89	2,95	3,00	3,05	3,11	3,18	3,23
1,1	3,32	3,38	3,44	3,51	3,57	3,67	3,74	3,82	3,90	3,98
1,2	4,10	4,18	4,26	4,35	4,44	4,55	4,66	4,75	4,87	4,98
1,3	5,09	5,21	5,33	5,46	5,58	5,72	5,85	6,00	6,18	6,35
1,4	6,56	6,75	6,95	7,17	7,40	7,63	7,89	8,15	8,43	8,70
1,5	9,05	9,34	9,65	10,0	10,4	10,9	11,3	11,9	12,4	12,9
1,6	13,7	14,4	15,2	15,9	16,6	17,2	18,2	19,1	20,1	21,1
1,7	21,8	23,1	24,1	25,5	26,1	27,2	28,4	29,8	31,3	32,9
1,8	34,6	36,3	38,0	39,7	41,4	43,1	44,9	46,7	48,5	50,4
1,9	52,2	56,0	60,0	64,0	69,0	74,0	79,0	85,0	91,0	97,0
2,0	104	111	118	125	133	141	149	158	167	176

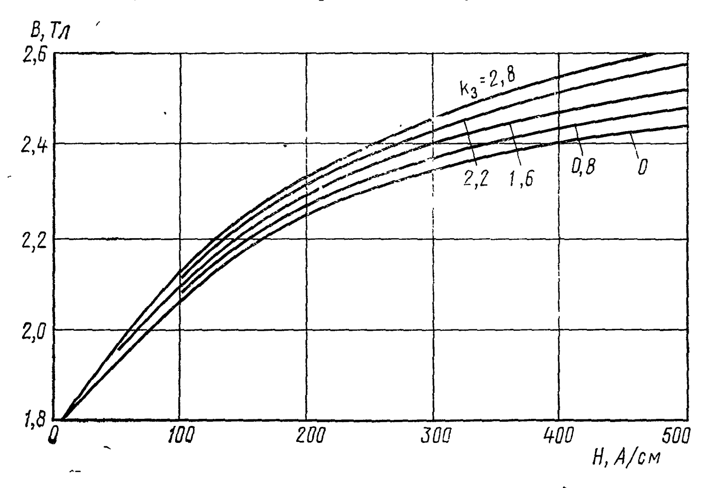
Приложение 13. **Таблица намагничивания для спинки машин переменного тока. Сталь 2411**

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,48	0,48	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,53	0,53	0,54
0,5	0,55	0,56	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,61	0,61	0,62
0,6	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,69	0,70	0,71
0,7	0,72	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,76	0,77	0,78	0,79
0,8	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,87	0,88	0,90	0,92	0,94
0,9	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,05	1,07	1,09	1,12	1,14
1,0	1,16	1,18	1,21	1,24	1,26	1,29	1,32	1,36	1,39	1,43
1,1	1,46	1,50	1,54	1,58	1,62	1,67	1,72	1,76	1,82	1,88
1,2	1,92	1,98	2,04	2,10	2,16	2,22	2,30	2,38	2,46	2,60
1,3	2,72	2,88	3,00	3,16	3,30	3,40	3,58	3,70	3,86	3,99
1,4	4,10	4,40	4,60	4,90	5,30	5,70	6,10	6,60	7,10	7,70
1,5	8,20	8,90	9,60	10,3	11,0	11,7	12,3	13,1	14,0	14,8
1,6	15,6	16,4	17,3	18,2	19,2	20,0	21,0	22,6	24,4	26,0
1,7	28,0	29,6	31,0	32,6	34,0	35,8	37,4	39,0	41,0	43,0
1,8	45,0	47,0	50,0	53,0	55,0	58,0	61,0	64,0	68,0	72,0
1,9	76,0	80,0	85,0	91,0	97,0	103	111	119	131	142
2,0	160	180	200	220	238	255	276	296	315	338

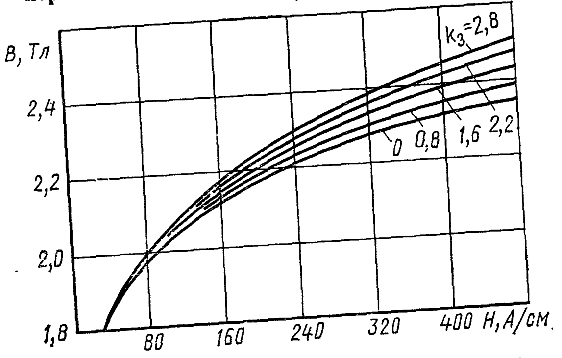
Приложение 14. **Кривые намагничивания для зубцов машин переменного тока при $B_з > 1{,}8$ Тл, сталь 2013**



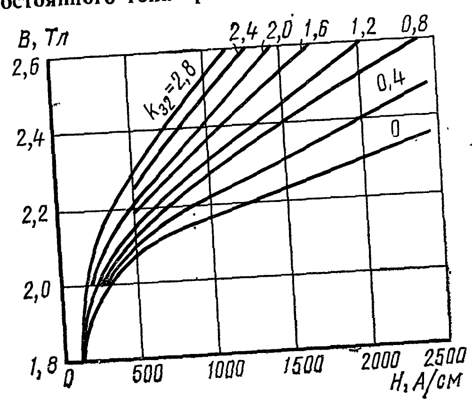
Приложение 15. **Кривые намагничивания для зубцов машин переменного тока при $B_з > 1{,}8$ Тл, сталь 2312**



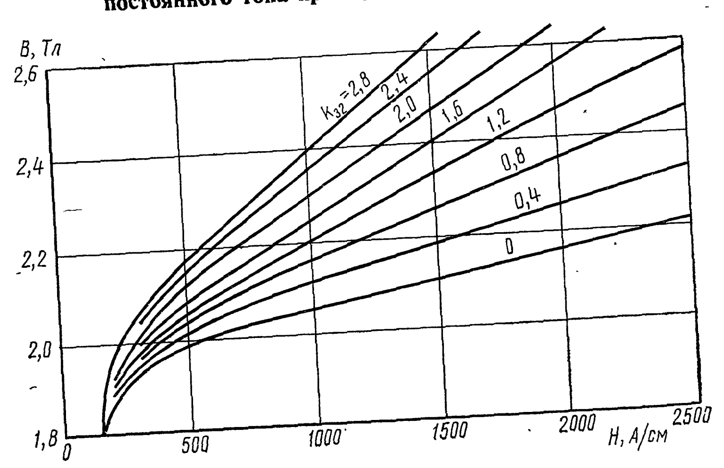
Приложение 16. **Кривые намагничивания для зубцов машин переменного тока при $B_з > 1{,}8$ Тл, сталь 2411**



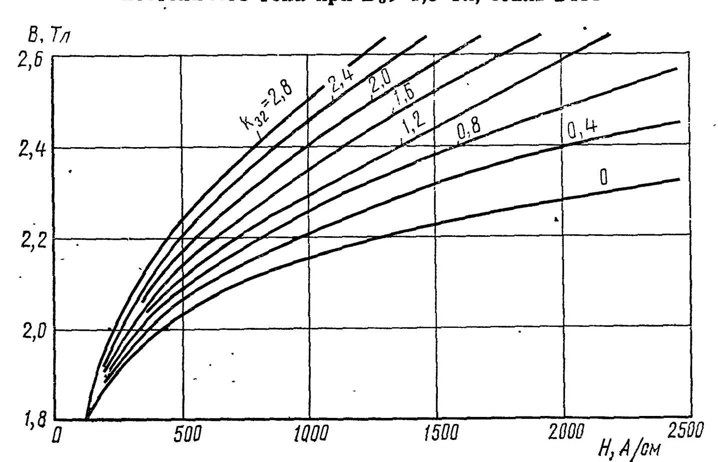
Приложение 17. **Кривые намагничивания для зубцов машин постоянного тока при $B_з > 1{,}8$ Тл, сталь 2013**



Приложение 18. **Кривые намагничивания для зубцов машин постоянного тока при $B_з > 1{,}8$ Тл, сталь 2312**



Приложение 19. Кривые намагничивания для зубцов машин постоянного тока при $B_з > 1{,}8$ Тл, сталь 2411



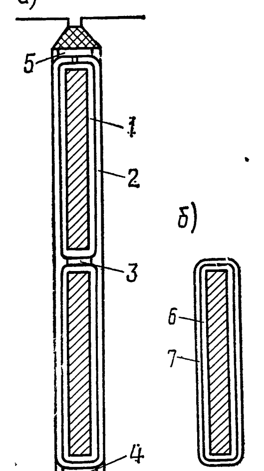
Приложение 20. Таблица намагничивания для полюсов машин постоянного тока. Сталь 3411

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
1,0	1,70	1,70	1,80	1,85	1,90	1,90	2,00	2,00	2,10	2,10
1,1	2,20	2,20	2,30	2,35	2,40	2,40	2,50	2,60	2,60	2,70
1,2	2,80	2,90	3,00	3,10	3,20	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60
1,3	3,70	3,80	4,00	4,10	4,20	4,30	4,50	4,60	4,70	4,80
1,4	5,00	5,20	5,40	5,60	5,80	6,00	6,20	6,40	6,60	6,80
1,5	7,00	7,30	7,60	7,90	8,20	8,50	8,80	9,10	9,40	9,70
1,6	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
1,7	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0	28,0	31,0	34,0	37,0
1,8	40,0	43,0	46,0	50,0	54,0	59,0	65,0	71,0	78,0	85,0
1,9	92,0	100	112	130	155	190	225	260	300	350
2,0	400	450	500	550	600	—	—	—	—	—

Приложение 21. Таблица намагничивания для монолитных станин машин постоянного тока и полюсов синхронных машин. Сталь 3

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,0	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72
0,1	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20	1,28	1,36	1,44	1,52
0,2	1,60	1,68	1,76	1,84	1,92	2,00	2,08	2,16	2,24	2,32
0,3	2,40	2,48	2,56	2,64	2,72	2,80	2,88	2,96	3,04	3,12
0,4	3,20	3,28	3,36	3,44	3,52	3,60	3,68	3,76	3,84	3,92
0,5	4,00	4,08	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,70	4,79
0,6	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74
0,7	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72
0,8	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87
0,9	7,98	8,10	8,23	8,35	8,48	8,50	8,73	8,85	8,98	9,11
1,0	9,24	9,38	9,53	9,69	9,83	10,0	10,2	10,4	10,6	10,7
1,1	10,9	11,1	11,3	11,5	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,7
1,2	12,9	13,1	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,5

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/см									
1,3	15,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6	19,2	19,7	20,3
1,4	20,9	21,6	22,3	23,0	23,7	24,4	25,3	26,2	27,1	28,0
1,5	28,9	29,9	31,0	32,1	33,2	34,3	35,6	37,0	38,3	39,
1,6	41,0	42,5	44,0	45,5	47,0	48,5	50,0	51,5	53,0	55,6
1,7	85,0	88,0	91,0	94,0	97,0	100	105	110	116	1220
1,8	128	134	140	146	152	158	164	171	178	185
1,9	202	208	214	221	228	235	245	255	265	275
2,0	290	302	315	328	342	361	380	400	420	440



Приложение 22. Изоляция обмотки фазного ротора асинхронных двигателей. Напряжение до 750 и до 1200 В. Пазы прямоугольные полузакрытые. Обмотка двухслойная, стержневая. Классы нагревостойкости B, F, H

Часть обмотки	Позиция по рисунку	Материал: наименование	Материал: толщина, мм	Количество слоев при 750 В	Количество слоев при более 750 В	Толщина изоляции (мм) при 750 В: по ширине	Толщина изоляции (мм) при 750 В: по высоте	Толщина изоляции (мм) при более 750 В: по ширине	Толщина изоляции (мм) при более 750 В: по высоте
Пазовая (рис. *а*)	*1*	Синтофолий	0,16	3,5	7,5	1,1	2,2	2,4	4,8
	2	Стеклолакоткань	0,15	1,0	1,0	0,3	0,3	0,3	0,3
	3	Стеклотекстолит	0,50	1,0	1,0	—	0,5	—	0,5
	4	„	0,50	1,0	1,0	—	0,5	—	0,5
	5	„	0,50	1,0	1,0	—	0,5	—	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки				0,3	0,5	0,3	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу				1,7	4,5	3,0	7,1
Лобовая (рис. *б*)	*6*	Лента стеклослюдинитовая	0,15	1 вполнахлеста	2 вполнахлеста	0,6	0,6	1,2	1,2
	7	Лента стеклянная	0,10	1 вполнахлеста	2 вполнахлеста	0,4	0,4	0,8	0,8
	—	Общая толщина изоляции стержня				1,0	1,0	2,0	2,0

Примечание. Марки изоляционных материалов указаны в прилож. 22а

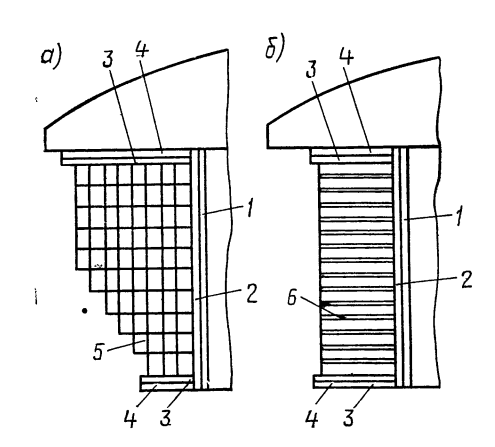
Приложение 22а

Наименование материала	Марка при классах		
	В	F	Н
Синтофолий	Синтофолий — F		Синтофолий—Н
Стеклолакоткань	ЛСП	ЛСП	ЛСП
Стеклотекстолит	СТ	СГЭФ	СТК
Лента стеклослюдинитовая	ЛС ПЭ934—ТП	ЛС ПЭ934—ТП	—
Пленка полиимидная	—	—	ПМ
Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС

Примечание. При классе нагревостойкости Н вместо ленты стеклослюдинитовой позиции 6 применить пленку полиимидную марки ПМ толщиной 3×0,05 мм.

Приложение 23.

Изоляция обмотки ротора синхронных машин. Напряжение возбуждения до 220 В. Классы нагрев стойкости изоляции В, F, Н

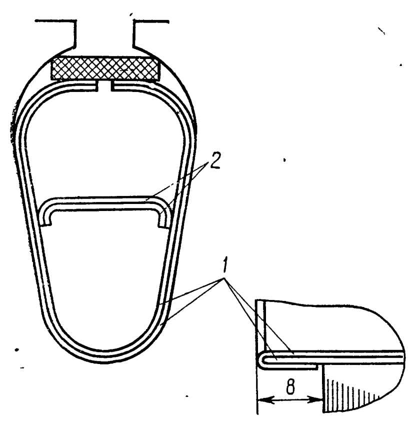


Позиция по рисунку*	Назначение	Материал		Количество слоев
		Наименование	Толщина, мм	
1	Изоляция сердечника	Синтофолий	0,16	10
2	„ „	Лента стеклянная	0,10	1 вполнахлеста
3	Рамка	Лакотакнеслюдопласт	0,50	1
4	„	Стеклотекстолит	3÷8	1
5	Прокладка междувитковая	Бумага асбестовая	0,30	1
6	Прокладка между рядами	Пленкостеклопласт	0,20	1

*Катушка из изолированных прямоугольных проводов (*а*) и из медной шины, намотанной на ребро (*б*).

Примечание. Марки изоляционных материалов указаны в прилож. 23а.

Наименование материала	Марка при классах		
	B	F	H
Синтофолий	Синтофолий—F		Синтофолий—H
Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС
Лакотканеслюдопласт	ГИТ—ЛСБ ЛСЛ	ГИП—ЛСП ЛСЛ	ГИК—ЛСК ЛСЛ
Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК
Пленкостеклопласт	«Изофлекс»	«Имидофлекс»	

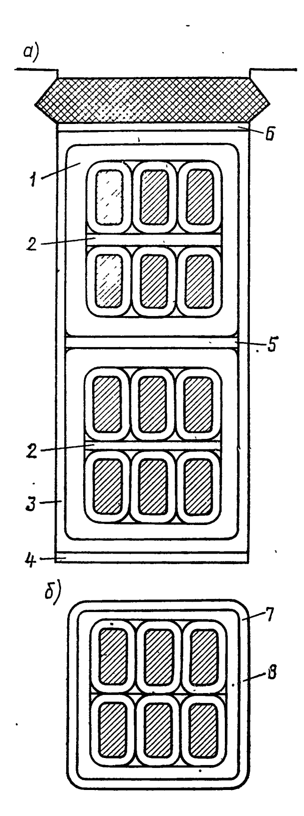


Приложение 24. **Изоляция обмотки якоря машин постоянного тока Напряжение до 600 В. Пазы овальные полузакрытые Обмотка двухслойная, всыпная. Провод круглый. Классы нагревостойкости В, F, H**

Высота оси вращения, мм	Позиция по рисунку	Материал		Количество слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
		наименование	толщина, мм		
80—112	*1*	Пленкостеклопласт	0,35	1	0,35
	2	»	0,35	1	0,35
132—200	*1*	Пленкостеклопласт	0,25	2	0,50
	2	»	0,25	2	0,50

Примечания: 1. Марка пленкостеклопласта—„Изофлекс" при классе В и „Имидофлекс" при классах F и H.

2. Прокладки в лобовых частях обмотки выполняют из материала поз. 1.



Приложение 25. **Изоляция обмотки якоря машин постоянного тока. Напряжение до 600 В. Пазы прямоугольные открытые. Обмотка двухслойная, с жесткими формованными катушками. Провод прямоугольный. Классы нагревостойкости В, F H**

Часть обмотки	Позиция по рисунку	Материал: наименование	Материал: толщина, мм	Количество слоев	Толщина изоляции, мм: по ширине	по высоте при w_{c2}: 1*	2*	3	4
Пазовая (рис. *а*)	1	Синтофолий	0,16	3,5 оборота	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2
	2	»	0,16	0—6	—	—	0,3	0,6	0,9
	3	Стеклолакоткань	0,15	1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
	4	Стеклотекстолит	0,50	1	—	0,5	0,5	0,5	0,5
	5	»	0,50	1	—	0,5	0,5	0,5	0,5
	6	»	0,50	1	—	0,5	0,5	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки			0,3	0,5	0,5	0,5	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой)			1,7	4,8	5,1	5,4	5,7
Лобовая (рис. *б*)	7	Лента стеклослюдинитовая	0,15	1 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	8	Лента стеклянная	0,10	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	—	Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)	—	—	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

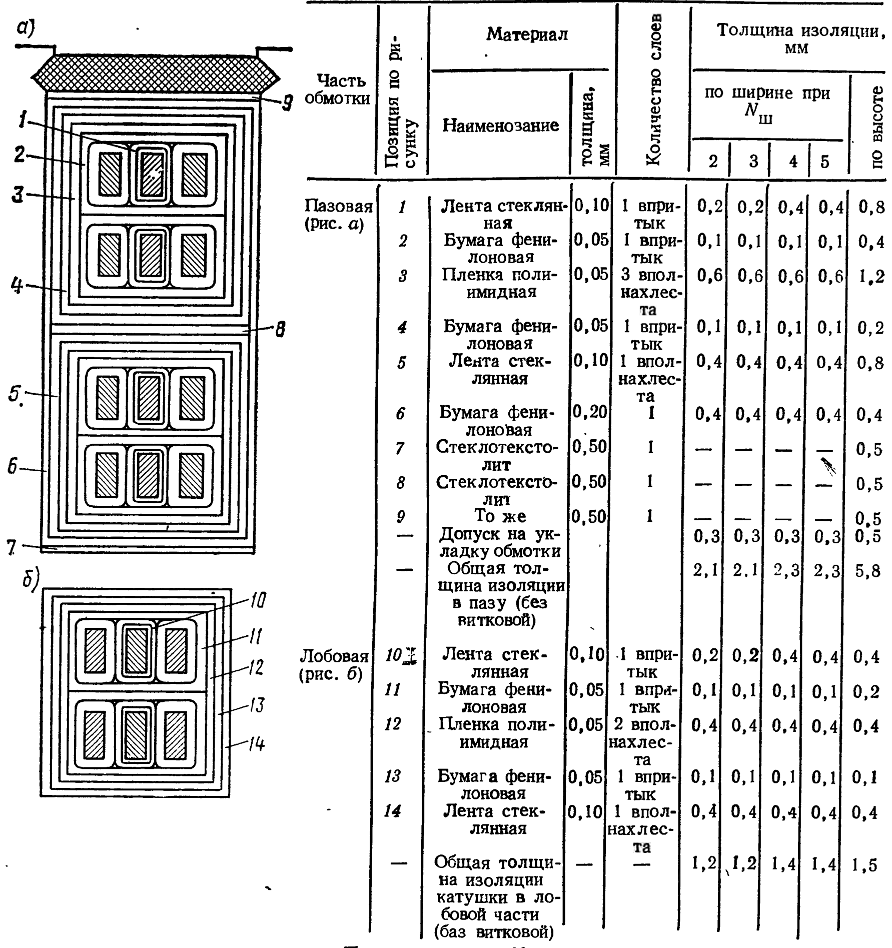
*Виток состоит из двух параллельных проводов, расположенных по высоте.

Примечание. Марки изоляционных материалов указаны в прилож. 25а.

Наименование материала	Марка при классах		
	B	F	H
Синтофолий	Синтофолий—F		Синтофолий—H
Стеклолакоткань	ЛСП	ЛСП	ЛСП
Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК
Лента стеклослюдинитовая	ЛС ПЭ 934—ТП		—
Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС
Пленка полиимидная	—	—	ПМ

Примечание. При классе нагревостойкости H вместо ленты стеклослюдинитовой поз. 7 применить пленку полиимидную толщиной 3×0,05 мм.

Приложение 26. Изоляция повышенной надежности обмотки якоря машин постоянного тока ($h \geqslant 355$ мм). Напряжение до 1000 В. Пазы прямоугольные открытые. Обмотка двухслойная, с жесткими формованными катушками. Провод прямоугольный. Классы нагревостойкости F, H



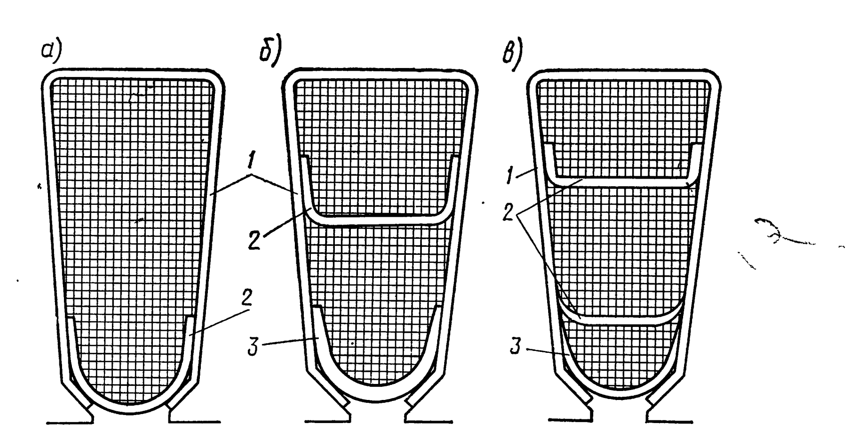
Часть обмотки	Позиция по рисунку	Материал: Наименование	Материал: толщина, мм	Количество слоев	Толщина изоляции, мм: по ширине при $N_ш$ 2	3	4	5	по высоте
Пазовая (рис. *а*)	1	Лента стеклянная	0,10	1 впритык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Бумага фенилоновая	0,05	1 впритык	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
	3	Пленка полиимидная	0,05	3 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	1,2
	4	Бумага фенилоновая	0,05	1 впритык	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	5	Лента стеклянная	0,10	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
	6	Бумага фенилоновая	0,20	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	7	Стеклотекстолит	0,50	1	—	—	—	—	0,5
	8	Стеклотекстолит	0,50	1	—	—	—	—	0,5
	9	То же	0,50	1	—	—	—	—	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки			0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой)			2,1	2,1	2,3	2,3	5,8
Лобовая (рис. *б*)	10	Лента стеклянная	0,10	1 впритык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	11	Бумага фенилоновая	0,05	1 впритык	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	12	Пленка полиимидная	0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	13	Бумага фенилоновая	0,05	1 впритык	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	14	Лента стеклянная	0,10	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	—	Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (баз витковой)	—	—	1,2	1,2	1,4	1,4	1,5

Примечание. Марки изоляционных материалов указаны в прилож. 26.

Наименование материала	Марки при классах	
	F	H
Пленка полиимидная	ПМ	ПМ
Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС
Стеклотекстолит	СТЭФ	СТК

Примечание. При классе нагревостойкости H вместо ленты стеклянной поз. 9 и 10 применить пленку полиимидную толщиной 0,05 один слой в полнахлеста.

Приложение 27. Изоляция обмотки статора машин переменного тока. Напряжение до 690 В. Пазы трапецеидальные полузакрытые. Обмотка однослойная и двухслойная, всыпная. Провод круглый. Классы нагревостойкости изоляции B, F, H



Обмотка	Высота оси вращения, мм	Позиция по рисунку	Толщина пленкостеклопласта, мм	Количество слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
Однослойная (рис. *а*)	50—80	*1*	0,20	1	0,20
		2	0,30	1	0,30
	90—132	*1*	0,25	1	0,25
		2	0,35	1	0,35
	160	*1*	0,40	1	0,40
		2	0,50	1	0,50
Двухслойная (рис. *б*)	180—280	*1*	0,40	1	0,40
		2	0,40	1	0,40
		3	0,50	1	0,50
Двухслойная (рис. *в*)*	180—280	*1*	0,40	1	0,40
		2	0,40	1	0,40
		3	0,50	1	0,50

* *в*—двухслойная обмотка синхронной машины с однослойной дополнительной обмоткой.

Примечания: 1. Марка пленкостеклопласта—„Изофлекс" при классе B и „Имидофлекс"—при классах F и H. 2. Прокладки в лобовых частях обмотки выполняют из материала поз. *1*.

Приложение 28.
Изоляция обмотки статора машин переменного тока. Напряжение до 690 В. Пазы прямоугольные полуоткрытые и открытые. Обмотка двухслойная, жесткими полукатушками. Провод прямоугольный. Классы нагревостойкости изоляции B, F, H

а) б) в)

Часть обмотки	Позиция по рисунку*	Материал: наименование	Материал: толщина, мм	Количество слоев	Толщина изоляции, мм, для пазов: рис. *а*, по ширине	рис. *а*, по высоте	рис. *в*, по ширине	рис. *в*, по высоте
Пазовая (рис. *а* и *в*)	1	Обволакивающее покрытие	0,05	1,0	0,2	0,2	0,2	—
	2	Бумага фенилоновая лакированная	0,09	1,5	0,6	0,6	0,6	0,6
	3	Лакотканеслюдопласт	0,55	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
	4	Стеклотекстолит	1,00	1,0	—	1,0	—	1,0
	5	То же	0,50	1,0	—	0,5	—	0,5
	6	»	0,50	1,0	—	0,5	—	0,5
	7	Бумага фенилоновая лакированная	0,09	1,5	—	—	0,6	0,6
	8	Лакотканеслюдопласт	0,55	1,0	—	—	1,1	1,1
	9	Стеклотекстолит	0,50	1,0	—	—	—	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки			0,3	0,6	0,3	0,6
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой)			2,2	4,5	2,2	6,5
Лобовая (рис. *б*)	—	Скрепляющий бандаж из ленты стеклянной 0,1×20 в двух местах	0,10	2,5	0,5	0,5	—	—
	1	Обволакивающее покрытие	0,05	1,0	0,1	0,1	—	—
	—	Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)	—	—	0,6	0,6	—	—

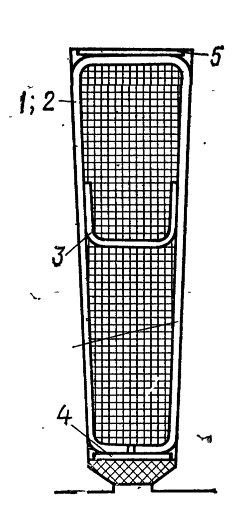
* *а* — пазовая часть обмотки асинхронного двигателя при прямоугольных полуоткрытых пазах; *б* — лобовая часть обмотки асинхронного двигателя при прямоугольных полуоткрытых пазах; *в* — пазовая часть обмотки синхронной машины при прямоугольных открытых пазах и наличии однослойной дополнительной обмотки.

Примечание. Марки изоляционных материалов указаны в прилож. 28а.

Наименование материала	Марка при классах		
	B	F	H
Лакотканеслюдопласт	ГИТ—ЛСБ—ЛСЛ	ГИП—ЛСП—ЛСЛ	ГИК—ЛСК—ЛСЛ
Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК
Стеклолакоткань	ЛСБ	ЛСП	—
Микалента	—	—	ЛФК—ТТ

Примечание. Крайние полукатушки фаз имеют дополнительную изоляцию на стеклолакоткани при классах B и F или микаленты — при классе H и из ленты стеклянной.

Приложение 29. Изоляция обмотки статора асинхронного двигателя. Напряжение до 660 В. $2p=10$ и 12. Пазы трапецеидальные полузакрытые. Обмотка двухслойная, всыпная. Провод круглый эмалированный. Классы нагревостойкости изоляции B, F, H



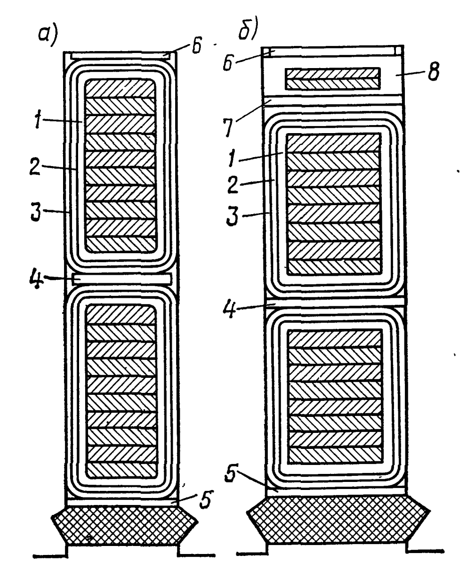
Позиция по рисунку	Материал: наименование	Материал: толщина, мм: класс B	Материал: толщина, мм: классы F, H	Количество слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм: B	Односторонняя толщина изоляции, мм: F, H
1	Пленкосинтокартон	0,25	0,28	1	0,25	0,28
2	Электронит	0,30	0,30	1	0,30	0,30
3	Лакотканеслюдопласт	0,55	0,55	1	0,55	0,55
4	Пленкосинтокартон	0,25	0,28	1	0,25	0,28
5	»	0,25	0,28	1	0,25	0,28

Примечания: 1. Поз. *1* — в сторону обмотки, поз. *2* — к стенке паза. Прокладки в лобовых частях обмотки выполняют из материала поз. *3*. 2. Марки изоляционных материалов указаны в прилож. 29а.

Приложение 29а

Наименование материала	Марка при классах		
	B	F	H
Пленкосинтокартон	ПСК—Л	ПСК—Ф	ПСК—Н
Лакотканеслюдопласт	ГИТ—ЛСБ ЛСЛ	ГИП—ЛСП ЛСЛ	ГИК—ЛСК ЛСЛ

Приложение 30. Изоляция обмотки статора машин переменного тока. Напряжение до 6300 В. Пазы прямоугольные открытые. Обмотка двухслойная, с жесткими катушками. Провод прямоугольный. Классы нагревостойкости изоляции B, F



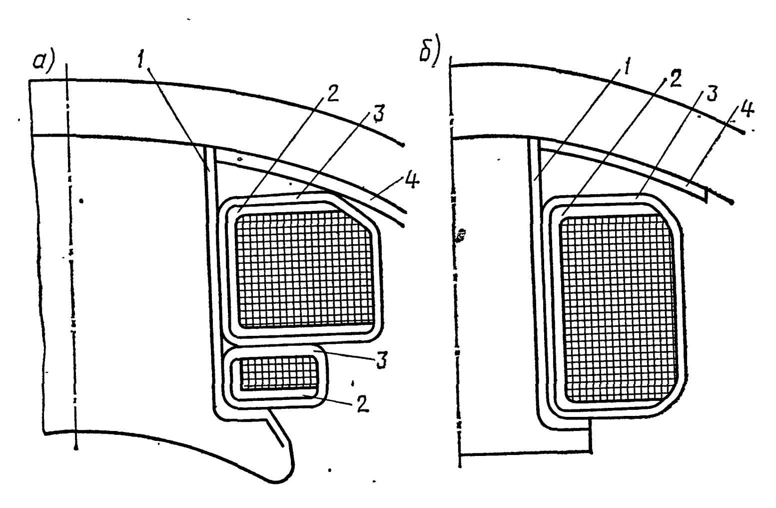
Часть обмотки	Позиция по рисунку*	Материал: наименование и марка	Материал: толщина, мм	Количество слоев	Толщина изоляции (мм) для пазов рис. *а*: по ширине	рис. *а*: по высоте	рис. *б*: по ширине	рис. *б*: по высоте
Пазовая	*1*	Стеклослюдопластовая лента ЛИ—СК—ТТ	0,14	4 вполнахлеста	2,24	4,48	2,24	4,48
	2	То же, ЛИ—СКу—ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	1,12	0,56	1,12
	3	Лента стеклянная ЛЭС	0,10	1 встык	0,20	0,40	0,20	0,40
	—	Разбухание от пропитки компаундом	—	—	0,80	2,80	0,80	2,80
	4	Стеклотекстолит СТ (класс B) и СТЭФ (класс F)	2,00	1	—	2,00	—	2,00
	5	То же	0,50	1	—	0,50	—	0,50
	6	»	0,50	1	—	0,50	—	0,50
	7	»	0,50	1	—	—	—	0,50
	8	Слюдопластофолий ИФГ—Б**	0,15	4,5***	—	—	1,10	1,10
	—	Допуск на укладку обмотки	—	—	0,30	0,60	0,50	0,80
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой)	—	—	4,10	12,40	4,30	14,20
Лобовая	—	Общая толщица изоляции катушки (без витковой)	—	—	3,80	4,40	3,80	4,40

* Обмотка статора асинхронного двигателя (*а*) и синхронной машины с однослойной дополнительной обмоткой (*б*).

** При классе F — синтофолий F, толщиной 0,16 мм, 3,5 оборота.

*** С учетом усадки на 15—20%.

Приложение 31. Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока. Неподразделенные катушки из изолированных проводов. Напряжение до 600 В. Классы нагревостойкости изоляции В, F, Н



Позиция на рисунке*	Назначение	Материал		Количество слоев
		наименование	толщина, мм	
1	Изоляция сердечника (напыление)	Эпоксидная смола	1,00	1
2	Изоляция катушки	Лакотканеслюдопласт	0,25	1
3	Изоляция катушки	Лента стеклянная	0,10	1 вполнахлеста
4	Рамка	Стеклотекстолит	0,50	1

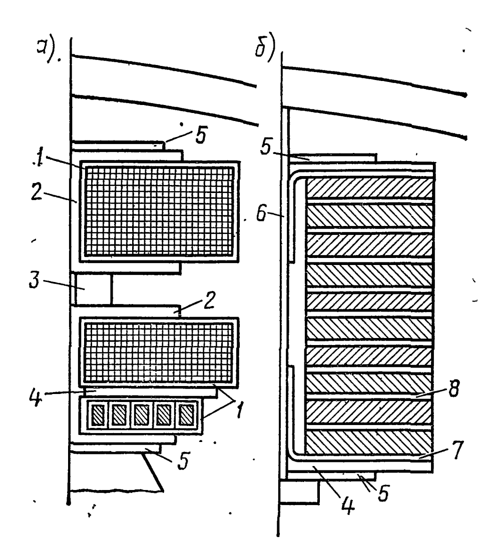
* Главный (*а*) и добавочный (*б*) полюса.

Примечание. Марки изоляционных материалов указаны в прилож. 31а.

Приложение 31а

Наименование материала	Марка при классах		
	B	F	H
Лакотканеслюдопласт	ГИТ—ЛСБ ЛСЛ	ГИП—ЛСП ЛСЛ	ГИК—ЛСК ЛСЛ
Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС
Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК

Приложение 32. Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока. Катушки главных полюсов шайбовые, из изолированных проводов; катушки добавочных полюсов из неизолированных проводов. Напряжение до 600 В. Классы нагревостойкости изоляции В, F, Н



Позиция на рисунке*	Назначение	Материал		Количество слоев
		наименование	толщина, мм	
1	Изоляция катушки	Лента стеклянная	0,1	1,0 вполнахлеста
2	Каркас	Стеклолакоткань	2,0	1,0
3	Скоба	Сталь марки Ст3	8—10	1,0
4	Рамка	Стеклотекстолит	1,50	1,0
5	Рамка	Сталь марки Ст3	1,50	1,0
6	Изоляция сердечника	Синтофолий	0,16	7,5
7	Изоляция углов	Лента стеклянная	0,10	1 вполнахлеста
8	Прокладка междувитковая	Бумага асбестовая	0,30	1,0

* Главный (*а*) и добавочный (*б*) полюса.

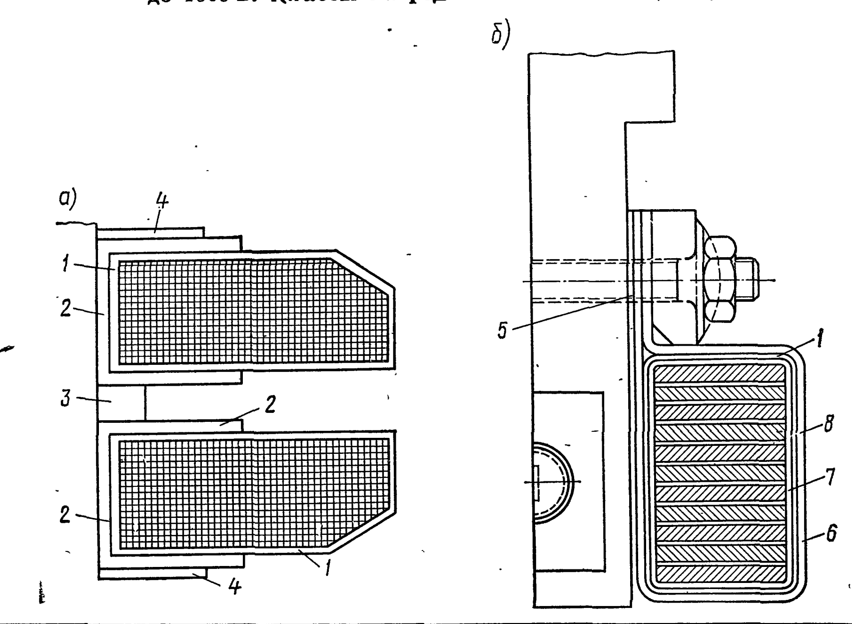
Примечание. Марки изоляционных материалов указаны в прилож. 32а.

Приложение 32а

Наименование изоляционного материала	Марка при классах		
	B	F	H
Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС
Стеклолакоткань	ГИТ—ЛСБ ЛСЛ	ГИП—ЛСП ЛСЛ	ГИК—ЛСК ЛСЛ
Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК
Синтофолий	Синтофолий F	Синтофолий F	Синтофолий Н

Примечание. При классе нагревостойкости Н вместо бумаги асбестовой поз. *7* применить бумагу фенилоновую 2×0,2 мм.

Приложение 33. Изоляция повышенной надежности обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока ($h \geq 355$ мм). Напряжение до 1000 В. Классы нагревостойкости изоляции F, H



Позиция по рисунку*	Назначение	Материал: наименование	Материал: толщина, мм	Количество слоев
1	Изоляция катушки	Лента стеклянная	0,10	1,0 вполнахлеста
2	Каркас	Стеклолакоткань	3,50	1,0
3	Скоба	Сталь марки Ст3	8—12	1,0
4	Рамка	Сталь марки Ст3	2—3	1,0
5	Изоляция сердечника	Синтофолий	0,16	7,5
6	Прокладка междувитковая	Бумага асбестовая	0,30	1,0
7	Изоляция катушки	Лента стеклослюдинитовая	0,15	7,0
8	Хомут	Латунь	2,00	1,0

* Главный (*а*) и добавочный (*б*) полюса.

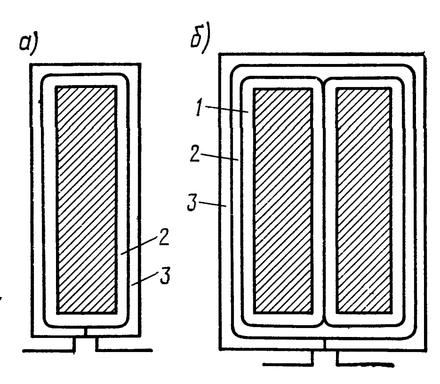
Примечание. Марки изоляционных материалов указаны в прилож. 33а.

Приложение 33а

Наименование изоляционного материала	Марка при классах F	Марка при классах H
Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС
Стеклолакоткань	ГИП—ЛСП ЛСЛ	ГИК—ЛСК ЛСЛ
Синтофолий	Синтофолий F	Синтофолий H
Лента стеклослюдинитовая	ЛС ПЭ 934—ТП	—
Пленка полиимидная	—	ПМ

Примечание. При классе нагревостойкости H вместо бумаги асбестовой поз. 6 применить бумагу фенилоновую 2×0,2 мм и вместо ленты стеклослюдинитовой поз. 7 — пленку полиимидную 3×0,05 мм.

Приложение 34. Изоляция компенсационной обмотки машин постоянного тока. Пазы прямоугольные полузакрытые. Обмотка однослойная стержневая. Напряжение до 1000 В. Классы нагревостойкости изоляции F, H



Позиция на рисунке*	Материал: наименование	Материал: толщина, мм	Количество слоев	Толщина изоляции, мм, при $N_ш=1$: по ширине	$N_ш=1$: по высоте	$N_ш=2$: по ширине	$N_ш=2$: по высоте
1	Лента стеклослюдинитовая	0,15	1 вполнахлеста	—	—	0,8	0,8
2	Синтофолий	0,16	3,5	1,1	1,1	1,1	1,1
3	Бумага фенилоновая	0,2	1,0	0,4	0,4	0,4	0,4
—	Допуск на укладку обмотки	—	—	0,2	0,4	0,3	0,4
—	Общая толщина изоляции в пазу	—	—	1,7	1,9	2,6	2,7

* Исполнение с одним (*а*) и с двумя (*б*) стержнями в пазу.

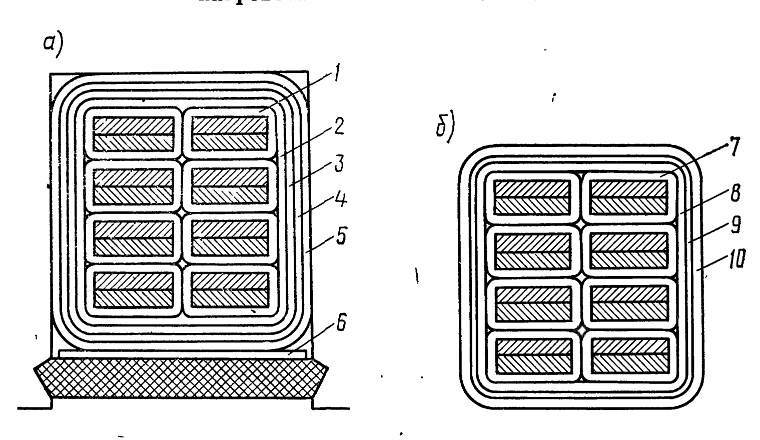
Примечание. Марки изоляционных материалов указаны в прилож. 34а.

Приложение 34а

Наименование материала	Марка при классах: F	H
Лента стеклослюдинитовая	ЛС ПЭ 994—ТП	—
Синтофолий	Синтофолий—F	Синтофолий—H
Пленка полиимидная	—	ПМ

Примечание. При классе нагревостойкости H вместо ленты стеклослюдинитовой поз. 1 применить пленку полиимидную толщиной 0,05 мм в два слоя вполнахлеста.

Приложение 35. Изоляция компенсационной обмотки машин постоянного тока. Пазы прямоугольные открытые. Обмотка однослойная секционная из неизолированных проводов. Напряжение до 1000 В. Классы нагревостойкости изоляции F, H



Часть обмотки	Позиция по рисунку	Материал: наименование	Материал: толщина, мм	Количество слоев	Толщина изоляции, мм: по ширине при $N_ш$ = 1	по ширине при $N_ш$ = 2	по высоте при $N_в$ = 2	по высоте при $N_в$ = 3	по высоте при $N_в$ = 4
Пазовая (рис. *а*)	*1*	Бумага фенилоновая	0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,8	0,8	1,2	1,6
	2	Пленка полиимидная	0,05	3 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	3	Бумага фенилоновая	0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	4	Лента стеклянная	0,10	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	5	Бумага фенилоновая	0,20	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	6	Стеклотекстолит	0,50	1	—	—	0,5	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки			0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу			2,5	2,9	3,6	4,0	4,4
Лобовая (рис. *б*)	*7*	Бумага фенилоновая	0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,8	0,8	1,2	1,6
	8	Пленка полиимидная	0,05	3 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	9	Бумага фенилоновая	0,05	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	10	Лента стеклянная	0,10	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	—	Общая толщина изоляции секции в лобовой части			1,8	2,2	2,2	2,6	3,0

Примечание. Марки изоляционных материалов указаны в прилож. 35а.

Приложение 35а

Наименование материала	Марки при классах	
	F	H
Пленка полиимидная	ПМ	ПМ
Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС
Стеклотекстолит	СТЭФ	СТК

Приложение 36. **Подшипники качения**

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
Шарикоподшипники радиальные однорядные (ГОСТ 8338—75)							
Легкая серия							
200	10	30	9	1,0	4 600	2 610	20 000
201	12	32	10	1,0	4 700	2 650	20 000
202	15	35	11	1,0	5 850	3 470	16 000
203	17	40	12	1,0	7 400	4 400	16 000
204	20	47	14	1,5	9 800	6 200	12 500
205	25	52	15	1,5	10 800	6 950	10 000
206	30	62	16	1,5	15 000	10 000	10 000
207	35	72	17	2,0	19 700	13 600	8 000
208	40	80	18	2,0	25 100	17 800	6 300
209	45	85	19	2,0	25 200	17 800	6 300
210	50	90	20	2,0	27 000	19 800	6 300
211	55	100	21	2,5	33 400	25 100	5 000
212	60	110	22	2,5	40 400	30 900	5 000
213	65	120	23	2,5	44 000	34 000	5 000
214	70	125	24	2,5	48 000	37 400	4 000
215	75	130	25	2,5	51 000	41 000	4 000
216	80	140	26	3,0	56 000	44 500	4 000
217	85	150	28	3,0	64 000	53 100	4 000
218	90	160	30	3,0	74 000	60 500	3 150
219	95	170	32	3,5	84 000	69 500	3 150
220	100	180	34	3,5	94 000	79 000	3 150
Средняя серия							
300	10	35	11	1,0	6 250	3 750	20 000
301	12	37	12	1,5	7 500	4 640	16 000
302	15	42	13	1,5	8 750	5 400	16 000
303	17	47	14	1,5	10 700	6 670	12 500
304	20	52	15	2,0	12 250	7 780	12 500
305	25	62	17	2,0	17 250	11 400	10 000
306	30	72	19	2,0	21 600	14 800	8 000
307	35	80	21	2,5	25 700	17 550	8 000
308	40	90	23	2,5	31 300	22 200	6 300
309	45	100	25	2,5	37 000	25 200	6 300
310	50	110	27	3,0	47 500	35 600	5 000
311	55	120	29	3,0	55 000	41 800	5 000
312	60	130	31	3,5	63 000	48 400	4 000
313	65	140	33	3,5	71 300	55 600	4 000
314	70	150	35	3,5	80 200	63 200	4 000
315	75	160	37	3,5	87 500	71 500	3 150
316	80	170	39	3,5	94 600	80 200	3 150

Условное обозначение подшипника	*d*, мм	*D*, мм	*B*, мм	*r*, мм	*C*, Н	C_0, Н	*n*, об/мин
317	85	180	41	4,0	102 000	89 400	3 150
318	90	190	43	4,0	110 000	99 000	3 150
319	95	200	45	4,0	117 600	109 000	2 500
320	100	215	47	4,0	134 000	130 000	2 500
321	105	225	49	4,0	141 000	142 000	2 500
322	110	240	50	4,0	158 000	167 000	2 500
324	120	260	55	4,0	167 000	180 000	2 000
326	130	280	58	5,0	176 500	194 000	1 600

Роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами (ГОСТ 8328—75)

Легкая узкая серия

2202	15	35	11	1,0	5 520	3 020	16 000
2204	20	47	14	1,5	11 700	7 250	12 500
2205	25	52	15	1,5	13 200	8 450	10 000
2206	30	62	16	1,5	17 000	11 200	10 000
2207	35	72	17	2,0	25 000	17 200	8 000
2208	40	80	18	2,0	33 000	23 500	8 000
2209	45	85	19	2,0	34 300	25 200	6 300
2210	50	90	20	2,0	38 000	28 600	6 300
2211	55	100	21	2,5	43 000	32 300	6 300
2212	60	110	22	2,5	53 700	42 000	5 000
2213	65	120	23	2,5	61 000	47 600	5 000
2214	70	125	24	2,5	67 500	47 700	4 000
2215	75	130	25	2,5	76 500	60 000	4 000
2216	80	140	26	3,0	78 000	62 300	4 000
2217	85	150	28	3,0	97 000	80 900	3 150
2218	90	160	30	3,0	119 000	99 000	3 150
2220	100	180	34	3,5	132 500	109 000	2 500

Средняя узкая серия

2305	25	62	17	2,0	22 000	14 500	8 000
2306	30	72	19	2,0	29 600	20 200	8 000
2307	35	80	21	2,5	33 400	22 800	6 300
2308	40	90	23	2,5	40 200	28 000	6 300
2309	45	100	25	2,5	55 500	40 000	6 300
2310	50	110	27	3,0	64 000	46 500	5 000
2311	55	120	29	3,0	82 500	61 500	5 000
2312	60	130	31	3,5	98 000	75 800	4 000
2313	65	140	33	3,5	103 000	78 800	4 000
2314	70	160	35	3,5	121 000	95 500	4 000
2315	75	160	37	3,5	139 000	110 000	3 150
2316	80	170	39	3,5	147 000	118 500	3 150
2317	85	180	41	4,0	175 000	143 000	3 150
2318	90	190	43	4,0	190 000	157 000	2 500
2319	95	200	45	4,0	206 000	171 500	2 500
2320	100	225	47	4,0	238 000	197 000	2 500
2322	110	240	50	4,0	301 000	257 000	2 000
2324	120	260	55	4,0	380 000	332 000	2 000
2326	130	280	58	5,0	424 000	374 000	2 000
2328	140	300	62	5,0	469 000	419 000	1 600
2332	160	340	68	5,0	541 000	497 000	1 600
2336	180	380	75	5,0	764 000	724 000	1 250
2340	200	420	80	6,0	860 000	818 000	1 250

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
Средняя широкая серия							
2605	25	62	24	2,0	36 700	27 800	8000
2606	30	72	27	2,0	40 900	30 600	8000
2607	35	80	32	2,5	45 800	34 200	6300
2608	40	90	33	2,5	59 900	46 600	6300
2609	45	100	36	2,5	77 700	61 500	6300
2610	50	110	39	2,5	102 000	85 500	5000
2611	55	120	43	3,0	113 000	92 500	5000
2612	60	130	46	3,5	137 500	116 000	4000
2613	65	140	48	3,5	149 000	126 500	4000
2615	75	160	55	3,5	208 000	183 000	3150
2616	80	170	58	3,5	220 000	198 000	3150
2617	85	180	60	4,0	254 000	230 000	3150
2618	90	190	64	4,0	265 000	240 000	2500
2620	100	215	73	4,0	356 000	336 000	2500
2622	110	240	80	4,0	464 000	450 000	2000
2624	120	260	86	4,0	548 000	532 000	2000
2626	130	280	93	5,0	650 000	650 000	2000
2630	150	320	108	5,0	753 000	757 000	1600
2634	170	360	120	5,0	1 040 000	1 080 000	1250

Подшипники шариковые радиальные однорядные с двусторонним уплотнением (ГОСТ 8882—75)

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
Легкая широкая серия							
180500	10	30	14	1,0	4 590	2 670	8000
180501	12	32	14	1,0	4 690	2 670	8000
180502	15	35	14	1,0	5 220	3 030	6300
180503	17	40	16	1,0	7 360	4 410	6300
180504	20	47	18	1,5	8 220	5 000	5000
180505	25	52	18	1,5	10 800	6 950	4000
180506	30	62	20	1,5	11 600	7 740	4000
180508	40	80	23	2,0	23 200	17 750	3150
180509	45	85	23	2,0	24 100	17 850	3150
Средняя широкая серия							
180602	15	42	17	1,5	8 750	5 410	8000
180603	17	47	19	1,5	10 700	6 680	8000
180604	20	52	21	2,0	12 250	7 800	10 000
180605	25	62	24	2,0	17 250	11 400	7500
180606	30	77	27	2,0	21 600	14 800	6000
180607	35	80	31	2,5	25 700	17 550	5500
180608	40	90	33	2,5	30 600	22 200	4500
180609	45	100	36	2,5	37 100	26 200	4500
180610	50	110	40	3,0	47 600	35 600	4100
180611	55	120	43	3,0	54 900	41 800	4000
180612	60	130	46	3,5	62 900	48 500	3400

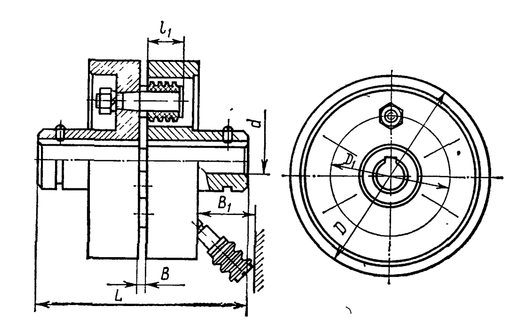
Шарикоподшипники радиально-упорные сдвоенные (ГОСТ 832—78)

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
Легкая серия							
346205	25	52	30	1,5	19 700	16 700	12 500
346206	30	62	32	1,5	25 800	22 000	10 000

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
346209	45	85	38	2,0	48 400	46 200	6 300
346222	110	200	76	3,5	216 500	270 000	3 150
346234	170	310	104	5,0	380 000	600 000	2 000
346244	220	400	130	5,0	412 000	696 000	1 000
Средняя серия							
346308	40	90	46	2,5	59 000	55 100	6 300
346310	50	110	54	3,0	89 500	88 000	5 000
346312	60	130	62	3,5	118 500	118 600	4 000
346313	65	140	66	3,5	140 500	150 000	4 000
346320	100	215	94	4,0	266 000	352 000	2 500
346322	110	240	100	4,0	297 000	414 000	2 000
346330	150	320	130	5,0	445 000	740 000	1 250

Примечание. d—внутренний диаметр; D—наружный диаметр; B—ширина; r—радиус закругления обойм; C—динамическая грузоподъемность; C_0—статическая грузоподъемность; n—предельная частота вращения подшипника.

Приложение 37. Размеры, масса, динамический момент инерции и наибольший допустимый крутящий момент упругих втулочно-пальцевых муфт

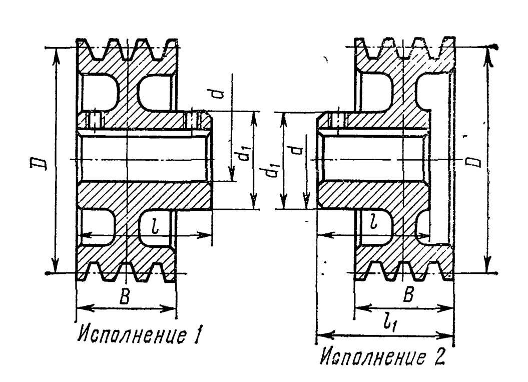


Условное обозначение	Размеры, мм							Наибольший крутящий момент, Н·м	Наибольшая частота вращения, об/мин	Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м²
	d	D	L	B	B_1	l_1	D_1				
МУВП 1—22	22	100	104	1—4	28	25	68	54	5600	2,140	0,002
МУВП 1—28	28	120	125	1—5	42	32	84	127	4750	4,400	0,006
МУВП 1—32	32	140	165	1—5	42	32	100	235	4000	7,330	0,014
МУВП 1—38	38	140	165	1—5	42	32	100	235	4000	6,970	0,014
МУВП 1—42	42	170	226	2—6	55	42	120	440	3350	13,27	0,039
МУВП 1—45	45	170	226	2—6	55	42	120	440	3350	12,93	0,039
МУВП 1—48	48	190	226	2—6	55	42	140	685	3000	18,04	0,064
МУВП 1—55	55	190	226	2—6	55	42	140	685	3000	17,12	0,064
МУВП 1—60	60	220	286	2—6	55	42	170	1080	2650	27,95	0,130
МУВП 1—65	65	220	286	2—6	55	42	170	1080	2650	27,17	0,130
МУВП 1—70	70	250	288	2—8	70	58	190	1960	2240	38,43	0,240
МУВП 1—75	75	250	288	2—8	70	58	190	1960	2240	37,29	0,240
МУВП 1—80	80	320	350	2—10	85	75	190	3920	1700	83,21	0,810

Условное обозначение	Размеры, мм							Наибольший крутящий момент, Н·м	Наибольшая частота вращения, об/мин	Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м²
	d	D	L	B	B_1	l_1	D_1				
МУВП 1—85	85	320	350	2—10	85	75	242	3920	1700	81,64	0,810
МУВП 1—90	90	320	350	2—10	85	75	242	3920	1700	80,01	0,81
МУВП 1—95	95	320	350	2—10	85	75	242	3920	1700	78,26	0,81
МУВП 1—100	100	400	432	2—12	110	90	242	7850	1400	161,8	2,45
МУВП 1—110	110	400	432	2—12	110	90	300	7850	1400	156,9	2,45
МУВП 1—120	120	400	432	2—12	110	90	300	7850	1400	151,6	2,45
МУВП 1—125	125	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	272,9	6,75
МУВП 1—130	130	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	269,3	6,75
МУВП 1—140	140	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	291	7,1
МУВП 1—150	150	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	282,9	7,1

Примечание. Данные таблицы соответствуют нормали машиностроения МН 2096—64.

Приложение 38. **Размеры, масса и динамический момент инерции клиноременных шкивов**

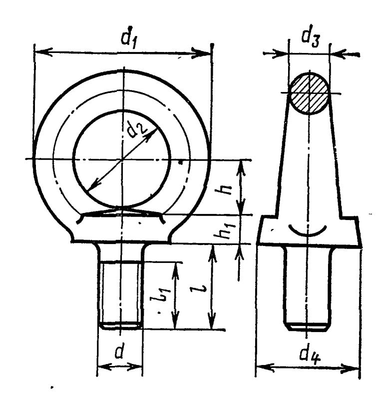


Исполнение 1

Исполнение 2

Условное обозначение	Размеры, мм						Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м²	Исполнение	Номер нормали машиностроения
	d	D	B	l	l_1	d_1				
121001	14	112	16	30	—	32	1,06	0,0015	1	МН 4437—63
121008	22	112	40	50	56	40	1,71	0,003	2	»
121010	28	112	40	60	—	50	1,95	0,003	1	»
121023	32	125	40	80	—	60	2,81	0,005	1	»
221029	38	140	38	80	—	80	5,40	0,011	1	МН 4440—63
221073	42	200	68	110	—	80	7,81	0,043	1	»
321070	48	224	105	110	—	80	14,0	0,105	1	МН 4443—63
324075	55	224	105	110	130	100	15,5	0,109	2	»
421030	60	250	138	140	—	125	28,0	0,23	1	МН 4446—63
421031	65	250	138	140	—	125	27,5	0,23	1	»
421051	70	280	164	140	—	125	34,1	0,39	1	»
421052	75	280	164	140	—	125	33,5	0,39	1	»

Приложение 39. **Размеры и масса рым-болтов**



Условное обозначение резьбы, d	Размеры, мм								Масса, рым-болта, кг	Допустимая масса машины, кг
	d_1	d_2	d_3	d_4	h	h_1	l	l_1 (не менее)		
М8	36	20	8	20	12	6	18	12	0,05	120
М10	45	25	10	25	16	8	21	15	0,12	200
М12	54	30	12	30	18	10	25	19	0,19	300
М16	63	35	14	36	20	12	32	25	0,31	550
М20	72	40	16	40	24	14	38	29	0,50	850
М24	90	50	20	50	29	16	45	35	0,87	1250
М30	108	60	24	63	37	18	55	44	1,58	2000
М36	126	70	28	75	43	22	63	51	2,43	3000
М42	144	80	32	85	50	25	72	58	3,72	4000
М48	162	90	36	95	52	30	82	68	5,54	5000
М56	180	100	40	105	60	34	95	78	8,09	6200

Приложение 40. Значения интеграла B

U_z	Значения интеграла B для следующих σU_z										
	0,220	0,225	0,230	0,235	0,240	0,245	0,250	0,255	0,260	0,265	0,270
Для $\overline{U}_c$=0,1625; $\sigma_{\overline{U}_c}$=0,0450											
0,40	5,640—3	5,996—3	6,353—3	6,712—3	7,070—3	7,427—3	7,784—3	8,139—3	8,492—3	8,843—3	9,191—3
0,45	3,592—3	3,880—3	4,174—3	4,472—3	4,774—3	5,080—3	5,388—3	5,698—3	6,002—3	6,322—3	6,635—3
0,50	2,192—3	2,410—3	2,637—3	2,870—3	3,111—3	3,357—3	3,608—3	3,865—3	4,125—3	4,390—3	4,657—3
0,55	1,280—3	1,436—3	1,601—3	1,774—3	1,954—3	2,142—3	2,337—3	2,539—3	2,746—3	2,959—3	3,177—3
0,60	7,159—4	8,207—4	9,337—4	1,055—3	1,183—3	1,320—3	1,463—3	1,614—3	1,771—3	1,935—3	2,105—3
0,65	3,828—4	4,494—4	5,228—4	6,031—4	6,902—4	7,842—4	8,851—4	9,928—4	1,107—3	1,228—3	1,355—3
0,70	1,957—4	2,357—4	2,809—4	3,315—4	3,877—4	4,495—4	5,171—4	5,906—4	6,700—4	7,552—4	8,463—4
0,75	9,562—5	1,184—4	1,448—4	1,752—4	2,096—4	2,484—4	2,917—4	3,397—4	3,926—4	4,503—4	5,131—4
0,80	4,463—5	5,693—5	7,161—5	8,890—5	1,091—4	1,323—4	1,588—4	1,889—4	2,226—4	2,602—4	3,018—4
0,85	1,990—5	2,620—5	3,394—5	4,334—5	5,459—5	6,790—5	8,346—5	1,015—4	1,221—4	1,456—4	1,721—4
0,90	8,470—6	1,153—5	1,542—5	2,029—5	2,628—5	3,357—5	4,231—5	5,268—5	6,484—5	7,897—5	9,523—5
0,95	3,442—6	4,857—6	6,717—6	9,119—6	1,217—5	1,598—5	2,069—5	2,641—5	3,329—5	4,147—5	5,108—5
1,00	1,335—6	1,956—6	2,803—6	3,934—6	5,418—6	7,330—6	9,756—6	1,279—5	1,653—5	2,108—5	2,656—5
1,05	4,943—7	7,535—7	1,121—6	1,629—6	2,319—6	3,237—6	4,437—6	5,980—6	7,936—6	1,038—5	1,339—6
1,10	1,746—7	2,775—7	4,292—7	6,473—7	9,539—7	1,376—6	1,945—6	2,700—6	3,683—6	4,945—6	6,540—6
1,15	5,886—8	9,770—8	1,574—7	2,468—7	3,772—7	5,630—7	8,222—7	1,177—6	1,653—6	2,281—6	3,096—6
1,20	1,892—8	3,288—8	5,530—8	9,026—8	1,433—7	2,217—7	3,350—7	4,951—7	7,167—7	1,018—6	1,420—6
1,25	5,805—9	1,058—8	1,860—8	3,167—8	5,232—8	8,405—8	1,316—7	2,010—7	3,004—7	4,396—7	6,310—7
1,30	1,698—9	3,251—9	5,992—9	1,066—8	1,835—8	3,066—8	4,979—8	7,879—8	1,217—7	1,837—7	2,717—7
1,35	4,73—10	9,55—10	1,848—9	3,441—9	6,186—9	1,076—8	1,816—8	2,980—8	4,763—8	7,430—8	1,133—7
1,40	1,26—10	2,68—10	5,45—10	1,056—9	2,003—9	3,634—9	6,383—9	1,088—8	1,802—8	2,907—8	4,576—8
Для $\overline{U}_c$=0,2167; $\sigma_{\overline{U}_c}$=0,0600											
0,40	7,030—3	7,405—3	7,779—3	8,152—3	8,552—3	8,891—3	9,257—3	9,620—3	9,979—3	1,034—2	1,069—2
0,45	4,612—3	4,928—3	5,246—3	5,568—3	5,892—3	6,217—3	6,554—3	6,870—3	7,197—3	7,524—3	7,849—3
0,50	2,905—3	3,154—3	3,409—3	3,670—3	3,936—3	4,207—3	4,481—3	4,760—3	5,041—3	5,325—3	5,610—3
0,55	1,756—3	1,940—3	2,132—3	2,332—3	2,539—3	2,752—3	2,972—3	3,197—3	3,427—3	3,662—3	3,901—3
0,60	1,018—3	1,147—3	1,284—3	1,428—3	1,581—3	1,741—3	1,907—3	2,081—3	2,261—3	2,446—3	2,637—3
0,65	5,653—4	6,505—4	7,431—4	3,428—4	9,497—4	1,064—3	1,184—3	1,312—3	1,446—3	1,587—3	1,733—3

0,70	3,008—4	3,543—4	4,136—4	4,788—4	5,502—4	6,276—4	7,112—4	8,010—4	8,969—4	9,988—4	1,107—3
0,75	1,533—4	1,851—4	2,212—4	2,619—4	3,073—4	3,576—4	4,129—4	4,734—4	5,391—4	6,101—4	6,864—4
0,80	7,482—5	9,278—5	1,137—4	1,378—4	1,654—4	1,966—4	2,317—4	2,707—4	3,140—4	3,615—4	1,134—4
0,85	3,495—5	4,459—5	5,613—5	6,979—5	8,579—5	1,043—4	1,256—4	1,498—4	1,771—4	2,077—4	2,418—4
0,90	1,562—5	2,054—5	2,661—5	3,400—5	4,287—5	5,340—5	6,578—5	8,019—5	9,679—5	1,158—4	1,372—4
0,95	6,683—6	9,074—6	1,211—5	1,592—5	2,063—5	2,637—5	3,328—5	4,151—5	5,121—5	6,253—5	7,562—5
1,00	2,734—6	3,841—6	5,294—6	7,173—6	9,562—6	1,256—5	1,626—5	2,078—5	2,623—5	3,276—5	4,043—5
1,05	1,070—6	1,558—6	2,221—6	3,106—6	4,267—6	5,766—6	7,670—6	1,006—5	1,301—5	1,661—5	2,097—5
1,10	4,006—7	6,053—7	8,941—7	1,293—6	1,834—6	2,553—6	3,494—6	4,706—6	6,244—6	8,171—6	1,055—5
1,15	1,434—7	2,253—7	3,454—7	5,174—7	7,584—7	1,089—6	1,536—6	2,128—6	2,901—6	3,893—6	5,151—6
1,20	4,906—8	8,035—8	1,280—7	1,990—7	3,019—7	4,482—7	6,519—7	9,303—7	1,304—6	1,797—6	2,439—6
1,25	1,605—8	2,744—8	4,554—8	7,352—8	1,157—7	1,777—7	2,671—7	3,930—7	5,672—7	8,038—7	1,120—6
1,30	5,020—9	8,975—9	1,554—8	2,611—8	4,266—8	6,793—8	1,056—7	1,604—7	2,387—7	4,482—7	4,987—7
1,35	1,501—9	2,811—9	5,085—9	8,907—9	1,514—8	2,502—8	4,028—8	6,329—8	9,720—8	1,461—7	2,154—7
1,40	4,28—10	8,43—10	1,596—9	2,920—9	5,169—9	8,879—9	1,483—8	2,412—8	3,829—8	5,939—8	9,017—8

Для $\overline{U}_c$=0,3250 $\sigma_{\overline{U}_c}$=0,0900

0,40	1,058—2	1,096—2	1,134—2	1,171—2	1,208—2	1,245—2	1,281—2	1,316—2	1,351—2	1,386—2	1,420—2
0,45	7,379—3	7,728—3	8,076—3	8,423—3	8,770—3	9,115—3	9,457—3	9,798—3	1,014—2	1,047—2	1,080—2
0,50	4,966—3	5,264—3	5,564—3	5,867—3	6,172—3	6,479—3	6,787—3	7,096—3	7,405—3	7,713—3	8,022—3
0,55	3,224—3	3,462—3	3,707—3	3,957—3	4,211—3	4,469—3	4,731—3	4,997—3	5,265—3	5,535—3	5,808—3
0,60	2,017—3	2,198—3	2,387—3	2,582—3	2,783—3	2,990—3	3,203—3	3,420—3	3,642—3	3,868—3	4,098—3
0,65	1,216—3	1,347—3	1,485—3	1,630—3	1,782—3	1,940—3	2,104—3	2,275—3	2,451—3	2,632—3	2,818—3
0,70	7,061—4	7,959—4	8,922—4	9,950—4	1,104—3	1,220—3	1,342—3	1,469—3	1,603—3	1,743—3	1,888—3
0,75	3,948—4	4,535—4	5,176—4	5,872—4	6,624—4	7,432—4	8,297—4	9,217—4	1,019—3	1,123—3	1,231—3
0,80	2,125—4	2,491—4	2,898—4	3,349—4	3,845—4	7,387—4	4,276—4	5,613—4	6,299—4	7,035—4	7,819—4
0,85	1,101—4	1,319—4	1,566—4	1,846—4	2,159—4	2,508—4	2,894—4	3,318—4	3,782—4	4,287—4	4,833—4
0,90	5,489—5	6,726—5	8,166—5	9,827—5	1,173—4	1,388—4	1,631—4	1,903—4	2,206—4	2,540—4	2,908—4
0,95	2,632—5	3,305—5	4,107—5	5,054—5	6,159—5	7,441—5	8,913—5	1,059—4	1,249—4	1,463—4	1,702—4
1,00	1,214—5	1,565—5	1,993—5	2,510—5	3,128—5	3,861—5	4,720—5	5,720—5	6,873—5	8,194—5	9,696—5
1,05	5,385—6	7,132—6	9,322—6	1,204—5	1,536—5	1,939—5	2,422—5	2,996—5	3,671—5	4,460—5	5,373—5
1,10	2,297—6	3,130—6	4,205—6	5,573—6	7,290—6	9,423—6	1,204—5	1,522—5	1,904—5	2,359—5	2,896—5
1,15	9,416—7	1,323—6	1,829—6	2,491—6	3,344—6	4,431—6	5,798—6	7,497—6	9,584—6	1,212—5	1,518—5
1,20	3,711—7	5,380—7	7,665—7	1,074—6	1,483—6	2,016—6	2,705—6	3,581—6	4,683—6	6,053—6	7,739—6
1,25	1,405—7	2,106—7	3,097—7	4,473—7	6,351—7	8,877—7	1,222—6	1,659—6	2,221—6	2,937—6	3,836—6
1,30	5,113—8	7,933—8	1,206—7	1,797—7	2,629—7	3,780—7	5,347—7	7,448—7	1,022—6	1,384—6	1,849—6
1,35	1,787—8	2,875—8	4,522—8	6,963—8	1,051—7	1,557—7	2,265—7	3,242—7	4,566—7	6,335—7	8,667—7
1,40	6,000—9	1,001—8	1,634—8	2,604—8	4,059—8	6,202—8	9,294—8	1,368—7	1,979—7	2,817—7	3,949—7

Пример пользования таблицей приложения 40: $\overline{U}_c$=0,1625 кВ, $\sigma\overline{U}_c$=0,0450; U_z=1,1 кВ; σU_z=0,230; B=4,292—7; $B=4{,}292\cdot 10^{-7}$

ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РАЗМЕРОВ

ЛАТИНСКИЕ БУКВЫ

A_1, A_2 — линейная нагрузка обмотки соответственно статора и компенсационной, ротора и якоря

a — количество пар параллельных ветвей обмотки якоря; меньший размер прямоугольного провода без изоляции; длина щетки

$a_{д}$; $a_{пос}$; a_1 — количество параллельных ветвей соответственно обмотки добавочных полюсов, последовательной обмотки главных полюсов, обмотки статора и компенсационной

$a_{у}$, $a_{ш}$ — среднее расстояние между боковыми поверхностями смежных полюсных наконечников соответственно узких, широких

$a_{п}$ — среднее расстояние между боковыми поверхностями сердечников смежных полюсов

$a_{доп}$ — минимальное допустимое расстояние между катушками возбуждения смежных полюсов

$a(t)$ — частота отказов

$B_{д}$; $B_{з1}$; $B_{з2}$; $B_{п}$; $B_{с1}$; $B_{с2}$; B_{δ}; $B_{\delta д}$ — магнитная индукция соответственно в сердечнике добавочного полюса, в зубцах статора и зубцах наконечника главного полюса, в зубцах ротора и якоря, в сердечнике полюса машины переменного тока и сердечнике главного полюса, в спинке статора и станине, в спинке ротора и якоря, в воздушном зазоре (максимальное значение), в воздушном зазоре под добавочным полюсом

b; $b_{ст}$ — больший размер соответственно прямоугольного провода без изоляции, стержня обмотки

b' — больший размер прямоугольного провода с изоляцией

$b_{д}$; $b_{з.к}$; $b_{з1}$; $b_{з.2}$; $b_{к}$: $b_{л1}$; $b_{л2}$; $b_{н.д}$; $b_{н.п}$; $b_{п}$; $b_{п1}$; $b_{п2}$; $b_{р.с}$; $b_{ш1}$; $b_{ш2}$ — ширина соответственно сердечника добавочного полюса, зоны коммутации, зубца в статоре и в наконечнике главного полюса, зубца в роторе и якоре, катушки возбуждения, катушки в лобовой части обмотки статора и компенсационной обмотки, катушки в лобовой части обмотки фазного ротора и якоря, наконечника добавочного полюса, полюсной дуги, сердечника полюса машины переменного тока и главного полюса, прямоугольного паза в штампе статора и наконечника главного полюса, прямоугольного паза в штампе ротора и якоря, рулонной стали, шлица паза статора и наконечника главного полюса, шлица паза ротора и якоря

$b_{з}$ — зазор между изолированным сердечником полюса и катушкой

$b_{и}$ — односторонняя толщина изоляции по ширине

$b'_{н.п}$ — расчетная ширина полюсной дуги

$b_{с}$; $b_{ск}$ — припуск по ширине паза соответственно на сборку сердечника, то же при наличии скоса пазов

$b_{ср1}$; $b_{ср2}$ — средняя ширина секции обмотки соответственно статора, ротора и якоря

$b_{\text{у}}$; $b_{\text{ш}}$ — ширина полюсной дуги пакета с полюсными наконечниками соответственно узкими, широкими

c — количество элементарных проводов в эффективном

$D_{\text{вен1}}$; D_1; D_2 — внутренний диаметр соответственно колеса центробежного вентилятора, сердечника статора и станины, сердечника ротора и якоря

$D_{\text{вен2}}$; D_2; $D_{\text{н2}}$ — наружный диаметр соответственно колеса центробежного вентилятора, сердечника статора и станины, сердечника ротора и якоря

$D_{\text{к}}$ — наружный диаметр коллектора; средний диаметр короткозамыкающего кольца ротора

d; d'; $d_{\text{к2}}$; $d_{\text{п2}}$ — диаметр соответственно неизолированного провода, провода с изоляцией, аксиального вентиляционного канала ротора и якоря, паза полюсного наконечника

$E_{\text{к}}$; $E_{\text{р}}$; E_0; E_1; E_2 — ЭДС соответственно коммутирующая в секции якоря, реактивная коммутируемой секции якоря, при холостом ходе, фазы обмотки статора, фазы обмотки ротора и обмотки якоря

$F_{\text{д}}$; $F_{\text{з1}}$; $F_{\text{з2}}$; $F_{\text{п}}$; $F_{\text{пос}}$; $F_{\text{п1}}$; $F_{\text{р2}}$; $F_{\text{с.п}}$; $F_{\text{с1}}$; $F_{\text{с2}}$; F_δ; $F_{\delta\text{д}}$; F_Σ; F_1; F_2 — МДС соответственно обмотки добавочного полюса, на участке зубцов статора и зубцов наконечника главного полюса, на участке зубцов ротора и якоря, параллельной или независимой обмотки возбуждения главного полюса, последовательной обмотки главного полюса, на участке воздушного зазора в стыке между главным полюсом и станиной, размагничивающего действия реакции якоря, на участке сердечника полюса машины переменного тока и главного полюса, на участке спинки статора и станины, на участке спинки ротора и спинки якоря, на участке воздушного зазора, на участке воздушного зазора между якорем и добавочным полюсом, приходящаяся на весь магнитопровод (суммарная на один полюс), обмотки статора и компенсационной обмотки, обмотки ротора и якоря

$f_{\text{вкл}}$ — частота включения электродвигателя

f; f_1 f_2 — частота соответственно в сети переменного тока или перемагничивания, напряжения или тока статора, напряжения или тока ротора

H — напор вентилятора

$H_{\text{в}}$ — скорость роста дефектности витковой изоляции

$H_{\text{з1}}$; $H_{\text{з2}}$; $H_{\text{п}}$; $H_{\text{с1}}$; $H_{\text{с2}}$ — напряженность магнитного поля соответственно в зубцах статора и наконечника главного полюса, в зубцах ротора и якоря, в главном полюсе, в спинке статора и в станине, в спинке ротора и спинке якоря

h; $h_{\text{б}}$; $h_{\text{д}}$; $h_{\text{к}}$; $h_{\text{л}}$; $h_{\text{л1}}$; $h_{\text{л2}}$; $h_{\text{п}}$; $h_{\text{п1}}$; $h_{\text{п2}}$; $h_{\text{р}}$; $h_{\text{с1}}$; $h_{\text{с2}}$; $h_{\text{ш1}}$; $h_{\text{ш2}}$ — высота соответственно оси вращения, бандажной канавки якоря, сердечника добавочного полюса, клина и короткозамыкающего кольца ротора, лопатки вентилятора, катушки в лобовой части статора и компенсационной обмотки, катушки в лобовой части обмотки фазного ротора и якоря, сердечника полюса машины переменного тока и главного полюса, паза в штампе статора и наконечника главного полюса, паза в штампе ротора и якоря, продольного ребра на внешней поверхности статора, спинки статора и станины, спинки ротора и спинки якоря, шлица паза статора и наконечника главного полюса, шлица паза ротора и якоря

$h_и$ — толщина изоляции по высоте

$h_с$ — припуск по высоте паза на сборку сердечника

$I_к$; $I_м$; $I_п$; $I_{ст}$; $I_{п\Sigma}$; I_0; I_1; I_2 — ток соответственно в короткозамыкающем кольце ротора, намагничивания, начальный пусковой, а также обмотки возбуждения машины переменного тока и параллельной или независимой обмотки возбуждения машины постоянного тока, стержня короткозамкнутого ротора, в пазу, холостого хода, фазы обмотки статора, фазы обмотки фазного ротора и якоря

$i_{уд}$ — ударный ток короткого замыкания

$J_д$; $J_{д1}$; $J_к$; $J_п$; $J_{пос}$; $J_{ст}$; $J_щ$; J_1; J_2 — плотность тока соответственно в обмотке добавочных полюсов, в дуге компенсационной обмотки, в короткозамыкающем кольце ротора, в обмотке возбуждения машины переменного тока и в параллельной или независимой обмотке возбуждения машины постоянного тока, в последовательной обмотке главных полюсов, в стержне обмотки ротора и компенсационной обмотки, под щетками на контактных кольцах и на коллекторе, в обмотке статора и в секционной компенсационной обмотке, в обмотке ротора и обмотке якоря

$J_{и.д}$; J — момент инерции соответственно динамический ротора и якоря машины, статический

K — количество коллекторных пластин

$k_{в.т}$; $k_{зап}$; $k_з$; $k_к$; $k_м$; $k_{нас}$; $k_{об1}$; $k_{об2}$; $k_п$; $k_{пр}$; $k_с$; $k_{ск}$; $k_{т.щ}$; $k_у$; $k_{фа}$; k_{ad}; k_{aq}; k_d; k_{d1}; k_q; k_{q1}; k_δ; $k_{\delta д}$ — коэффициент соответственно вытеснения тока, запаса МДС обмотки возбуждения, учитывающий частичное прохождение магнитного потока через паз, компенсации МДС якоря компенсационной обмоткой, заполнения паза медью, насыщения магнитной цепи, обмоточный статора, обмоточный ротора, заполнения паза изолированными проводами, характеризующий качество пропитки, заполнения сердечника сталью, скоса пазов, трения щеток, укорочения обмотки, формы поля реакции якоря, приведения МДС реакции якоря по продольной оси к МДС обмотки возбуждения, то же по поперечной оси, формы поля статора по продольной оси, приведения МДС обмотки статора по продольной оси к МДС обмотки возбуждения, формы поля статора по поперечной оси, приведения МДС обмотки статора по поперечной оси к МДС обмотки возбуждения, воздушного зазора, воздушного зазора для добавочного полюса

$k_{з.к}$; $k_н$; $k_т$ — отношение соответственно ширины зоны коммутации к нейтральной зоне, ЭДС к напряжению, тока якоря к току машины

L — индуктивность обмоток

$l_б$; $l_в$; $l_д$; $l_к$; $l_{н.д}$; $l_{обр}$; $l_п$; $l_{п1}$; $l_{п2}$; $l_{ст}$; $l_у$; $l_ш$; $l_{эл}$ — длина соответственно бандажной канавки якоря, вылета лобовой части обмотки, сердечника добавочного полюса, активной части коллектора или короткозамыкающего кольца ротора или радиального вентиляционного канала, наконечника добавочного полюса, образца, сердечника полюса машины переменного тока и главного полюса, пакета сердечника статора, пакета сердечника ротора и якоря, стержня обмотки, пакета сердечника полюса с узкими полюсными наконечниками, то же с широкими наконечниками, элементарного участка

$l_{з1}$; $l_{з2}$; $l_{с.п}$; $l_{с1}$; $l_{с2}$ — средняя длина пути магнитного потока соответственно в зубце статора и в зубце наконечника главного

полюса, в зубце ротора и якоря, в сердечнике полюса машины переменного тока и главного полюса, в спинке статора и в станине, в спинке ротора и якоря

$l_л$ — средняя длина одной лобовой части секции обмотки и длина лопатки вентилятора

$l_{ср.д}$; $l_{ср.д1}$; $l_{ср.п}$; $l_{ср.пос}$; $l_{ср1}$; $l_{ср2}$ — средняя длина соответственно витка обмотки добавочных полюсов и витка дополнительной обмотки статора, соединительной дуги стержневой компенсационной обмотки, витка обмотки возбуждения машины переменного тока и параллельной или независимой обмотки возбуждения машины постоянного тока, витка последовательной обмотки главных полюсов, витка обмотки статора и секционной компенсационной обмотки, витка обмотки ротора и якоря

$l_{эф.п}$; $l_{эф1}$; $l_{эф2}$ — эффективная длина сердечника соответственно полюса машины переменного тока и главного полюса, сердечника статора и шихтованной станины, сердечника ротора и якоря

l_1 — полная длина сердечника статора и длина станины

l_2 — полная длина сердечника ротора и якоря

l'_1; l'_2 — расчетная длина сердечника соответственно статора, ротора и якоря

M; $M_п$; $M_{эм}$; M_{max}; M_0; M_2 — момент соответственно вращающий, начальный пусковой, электромагнитный, максимальный, холостого хода, полезный (отдаваемый)

m; m_1; m_2 — количество соответственно ходов обмотки якоря, фаз обмотки статора, фаз обмотки ротора

$m_{ал2}$; $m_д$; $m_{з1}$; $m_{з2}$; $m_и$; $m_к$; $m_{маш}$; $m_{м.д}$; $m_{м.к}$; $m_{м.п}$; $m_{м.пос}$; $m_{м.у}$; $m_{м\Sigma}$; $m_{м1}$; $m_{м2}$; $m_п$; $m_{с\Sigma}$; $m_{с1}$; $m_{с2}$ — масса соответственно алюминия короткозамкнутого ротора, стали сердечников добавочных полюсов, стали зубцов статора и зубцов наконечника главного полюса, стали зубцов ротора и зубцов якоря, изоляции, конструкционных материалов, машины, меди обмотки добавочных полюсов, меди короткозамыкающих или контактных колец ротора и коллектора, меди обмотки возбуждения машины переменного тока и параллельной или независимой обмотки возбуждения машины постоянного тока, меди последовательной обмотки возбуждения главных полюсов, меди успокоительной (демпферной) обмотки, меди суммарная, меди обмотки статора и компенсационной обмотки, меди обмотки ротора и якоря, стали сердечников полюсов машины переменного тока и главных полюсов, активной стали суммарная, стали спинки статора и станины, стали спинки ротора и спинки якоря

$N_в$; $N_д$; $N_л$; $N_п$; $N_{ур}$; $N_ш$; $N_щ$; $N_{щ\Sigma}$; N_1; N_2 — количество соответственно проводников, лежащих рядом по высоте в пазу и в катушке возбуждения, эффективных проводников дополнительной обмотки статора в пазу, лопаток вентилятора, эффективных проводников в пазу, уравнительных соединений обмотки якоря, проводников, лежащих рядом по ширине в пазу и в катушке возбуждения, щеток на одном бракете, щеток в машине, стержней компенсационной обмотки, приходящихся на один полюс, проводников обмотки фазного ротора и якоря или стержней демпферной обмотки, приходящихся на один полюс

n — частота вращения

n_0; n_1; n_2 — частота вращения соответственно при холостом ходе, синхронная, ротора

$n_б$; $n_к$; $n_п$; $n_р$ — количество соответственно бандажных канавок якоря, аксиальных и радиальных каналов в сердечнике, пакетов сердечника, продольных ребер на внешней поверхности статора

$n_{кр}$; $n_у$; $n_ш$ — количество пакетов с полюсными наконечниками соответственно крайними, узкими, широкими

$n_{пр1}$; $n_{пр2}$ — коэффициент приведения соответственно сопротивления обмотки ротора к обмотке статора, тока кольца к току стержня

$n_{тр}$ — коэффициент трансформации ЭДС и тока

$P_{ал2}$; $P_{вен}$; $P_д$; $P_{з1}$; $P_{з2}$; $P_к$; $P_{к.щ}$; $P_{м.д}$; $P_{м.д1}$; $P_{м.п}$; $P_{м.пос}$; $P_{м.ст}$; $P_{мх\Sigma}$; $P_{м1}$; $P_{м2}$; $P_{c\Sigma}$; P_{c1}; P_{c2}; $P_{т.п}$; $P_{т.щ}$; P_Σ; P_0 — потери соответственно ротора (обмотка из алюминия), на трение о воздух и на вентиляцию машины, добавочные, в зубцах статора, в зубцах ротора и якоря, короткого замыкания, в переходных контактах щеток, в обмотке добавочных полюсов, в дугах компенсационной обмотки, в обмотке возбуждения машины переменного тока и в параллельной или независимой обмотке возбуждения машины постоянного тока, последовательной обмотки главных полюсов, в стержнях компенсационной обмотки, механические суммарные, в обмотке статора и в компенсационой обмотке, в обмотке ротора (обмотка из меди) и якоря, в стали суммарные, в спинке статора, в спинке ротора и якоря, трения в подшипниках, трения щеток о коллектор, в машине суммарные, холостого хода

P'; $P_{эм}$; P_1; P_2; P_2' — мощность соответственно расчетная (внутренняя) машины, электромагнитная, подводимая к машине, полезная (отдаваемая), механическая ротора

$P_п$; $P_{м.в}$; $P_{м.ф}$; $P_{об}$ — вероятность безотказной работы соответственно пазовой, межвитковой, межфазовой изоляции, обмотки

$P\{t\}$ — вероятность безотказной работы

p; $p_д$ — количество соответственно пар полюсов машины переменного тока и главных полюсов, пар добавочных полюсов

$Q\{t\}$ — вероятность отказа

q — вероятность плотного касания соседних витков

q_1; q_2 — количество пазов на полюс и фазу соответственно в статоре, в роторе

$R_н$; $R_м$ — эквивалентное активное сопротивление схемы замещения, то же при максимальном моменте

$r_д$; $r_{д1}$; $r_к$; $r_м$; $r_п$; $r_{пос}$; $r_{ст}$; r_0; r_1; r_2; r'_2; $r_{2\Sigma}$ — активное сопротивление соответственно обмотки добавочных полюсов, дуг компенсационной обмотки, короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня, намагничивающего контура, обмотки возбуждения машины переменного тока и параллельной или независимой обмотки возбуждения машины постоянного тока, последовательной обмотки главных полюсов, стержней компенсационной обмотки, обмотки статора для токов нулевой последовательности, фазы обмотки статора и компенсационной обмотки, обмотки короткозамкнутого ротора или фазы обмотки фазного ротора или обмотки якоря,

обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, обмоток якорной цепи (суммарное)

$S_д$; $S_{з1}$; $S_{з2}$; $S_п$; $S'_п$; $S''_п$; S_{c1}; S_{c2}; S_δ; S; S'; $S_{д1}$; $S_к$; $S_{ст}$ — площадь поперечного сечения соответственно сердечника добавочного полюса и провода дополнительной обмотки статора, зубцов статора и зубцов наконечника главного полюса, зубцов ротора и якоря, сердечника полюса машины переменного тока и главного полюса; паза в штампе, паза в свету, паза, занимаемая обмоткой, спинки статора и станины, спинки ротора и спинки якоря, в воздушном зазоре, неизолированного провода, провода с изоляцией, дуги компенсационной обмотки, короткозамыкающего кольца, стержня обмотки

$S_{2\Sigma}$ — суммарная площадь поперечного сечения стержней демпферной обмотки на одном полюсе

$S''_{п.о}$; $S''_{п.д}$ — площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой статора соответственно основной, дополнительной

$S_щ$; $S_{щ\Sigma}$ — контактная поверхность соответственно одной щетки, всех щеток машины

s — скольжение асинхронного двигателя

$s_{кр}$ — критическое скольжение асинхронного двигателя при максимальном моменте

T — средняя наработка до отказа

$T_{дd}$; $T_{дq}$ — постоянная времени демпферной обмотки при разомкнутой обмотке статора соответственно по продольной оси, по поперечной оси

$T''_{дd}$; $T''_{дq}$ — постоянная времени демпферной обмотки при замкнутой накоротко обмотке статора соответственно по продольной и поперечной осям

$T_м$; $T_э$ — постоянная времени машины соответственно электромеханическая, электромагнитная

t — температура, ширина щетки

$t_к$ — коллекторное деление

t_0 — максимальная допустимая температура для данного класса нагревостойкости изоляции

t_1; t_2 — зубцовое деление соответственно статора и наконечника главного полюса, ротора и якоря

U; $U_д$; $U_к$; $U_п$; U_0 — напряжение соответственно линейное (для машин переменного тока) и сети (для машин постоянного тока), дополнительной обмотки статора, на кольцах ротора или короткого замыкания или среднее между коллекторными пластинами, на выводах обмотки возбуждения, холостого хода

U_1; $\bar{U}_1$ — напряжение фазы статора, среднее значение фазных коммутационных напряжений

V — расход охлаждающего воздуха

$v_{вен}$; $v_к$; v_2 — линейная скорость соответственно вентилятора, коллектора, ротора и якоря

$w_д$; $w_п$; $w_{пос}$; w_{c2}; w_1; w_2 — количество витков соответственно дополнительной обмотки статора и на полюс обмотки добавочных полюсов, на полюс обмотки возбуждения машины переменного тока и параллельной или независимой обмотки возбуждения машины постоянного тока, на полюс последовательной обмотки главных полюсов, в секции обмотки якоря, последовательно соединен-

ных в фазе обмотки статора и на полюс компенсационной обмотки, последовательно соединенных в фазе обмотки витков ротора и обмотки якоря (общее)

$X_к$ — расчетное приведенное индуктивное сопротивление короткого замыкания

$X_м$ — главное индуктивное сопротивление

$x_п$; x_{d1}; x_{q1}; x_0; x_1; x_2; x'_2; x_σ — индуктивное сопротивление соответственно обмотки возбуждения, обмотки статора по продольной оси, обмотки статора по поперечной оси, обмотки статора для токов нулевой последовательности, фазы обмотки статора, обмотки статора для токов обратной последовательности и обмотки ротора, обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, рассеяния

x_{ad}; x_{aq} — индуктивное сопротивление реакции якоря соответственно по продольной и поперечной осям

x_d; x_q — синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора соответственно по продольной и поперечной осям

x'_d; x''_d — индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси соответственно переходное, сверхпереходное

Y — проводимость обмотки

y; y_1; y_2 — шаг обмотки якоря по элементарным пазам соответственно результирующий, первый частичный, второй частичный

$y_к$; $y_п$; $y_{ур}$ — шаг соответственно по коллектору, обмотки по реальным пазам, уравнительных соединений обмотки якоря

Z — эквивалентное аэродинамическое сопротивление воздухопровода и полное сопротивление обмотки

$Z_к$; $Z_м$; $Z_н$; Z_∞ — сопротивление соответственно расчетное приведенное полное короткого замыкания, полное схемы замещения при максимальном моменте, полное схемы замещения, расчетное приведенное полное при бесконечно большом скольжении ($s=\infty$)

Z_1; Z_2 — количество пазов соответственно в статоре и в наконечнике главного полюса, в роторе и якоре

Греческие буквы

α — коэффициент теплопередачи поверхности, действительный коэффициент полюсной дуги

$\alpha_у$; $\alpha_ш$ — коэффициент полюсного перекрытия для пакетов с полюсными наконечниками соответственно узкими, широкими

α' — расчетный коэффициент полюсной дуги

γ — количество коллекторных пластин, перекрытых щеткой, удельная электрическая проводимость

$\Delta_{шт}$ — припуск на штамповку

Δt — превышение температуры обмоток, коллектора, воздуха и перепад температуры в изоляции

ΔU; $\Delta U_щ$ — падение напряжения соответственно в обмотках якорной цепи, в контакте щеток

δ; $\delta_д$; $\delta_{п1}$; $\delta_{п2}$ — воздушный зазор соответственно между сердечниками статора и ротора или между якорем и главным полюсом, между якорем и добавочным полюсом, в стыке между главным полюсом и станиной, в стыке между сердечником полюса и полюсным наконечником или между сердечниками полюса и ротора

η — коэффициент полезного действия

θ — угол нагрузки синхронной машины

λ — отношение длины сердечника к его диаметру; коэффициент теплопроводности изоляции

$\lambda_{д1}$; $\lambda_{д2}$ — коэффициент проводимости дифференциального рассеяния соответственно статора, ротора

$\lambda_{кл}$; $\lambda_{л1}$; $\lambda_{п1}$; $\lambda_{п2}$; $\lambda_{ск}$; λ_1; λ_2 — коэффициент проводимости рассеяния соответственно короткозамыкающих колец ротора, лобовых частей обмотки статора, паза статора, паза ротора и якоря, скоса пазов, обмотки статора, обмотки ротора

λ_0 — дефектность витковой изоляции до начала эксплуатации электродвигателя

$\lambda(t)$ — интенсивность отказа

ξ — величина, характеризующая степень повышения активного и уменьшения индуктивного сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора при вытеснении тока

Π — периметр поверхности охлаждения

ρ — удельное электрическое сопротивление

ρ_1 — коэффициент сопротивления статора

σ; $\sigma_д$; $\sigma_{н.п}$ — коэффициент магнитного рассеяния соответственно полюсов машины переменного тока и главных полюсов, добавочных полюсов, наконечников полюсов машин переменного тока и главных полюсов

$\sigma_{\overline{Н1}}$; $\sigma_{\overline{t}}$ — среднее квадратичное отклонение соответственно фазных коммутационных напряжений, температуры обмотки

τ — полюсное деление, наработка

τ_1 — коэффициент рассеяния статора

Φ; $\Phi_д$; $\Phi_{\delta д}$ — магнитный поток соответственно в воздушном зазоре, в сердечнике добавочного полюса, в воздушном зазоре под добавочным полюсом

φ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления пазовой части стержня ротора при вытеснении тока

ψ — коэффициент, учитывающий уменьшение проводимости пазового рассеяния при вытеснении тока

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов А. И., Иванов-Смоленский А. В.* Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. — М.: Высшая школа, 1979.—312 с.

2. *Алексеев А. Е.* Конструкция электрических машин. — М.: Госэнергоиздат, 1958.—390 с.

3. *Алексеев А. Е., Кожевников В. А.* Фактор коммутационной стойкости тяговых двигателей постоянного тока. — Вестник электропромышленности, 1963, № 4, с. 44—48.

4. Асинхронные двигатели общего назначения/ Под ред. *В. М. Петрова* и *А. Э. Кравчика.* — М.: Энергия, 1980.—488 с.

5. *Видеман Е., Келленбергер В.* Конструкция электрических машин. — Л.: Энергия, 1972.—520 с.

6. *Видмар М.* Экономические законы проектирования электрических машин. — М.: ГОНТИ, 1930.—120 с.

7. *Виноградова А. А., Демусяк А. Г.* Международная стандартизация в области электротехники и радиоэлектроники. — М.: Энергия, 1974.—205 с.

8. *Вольдек А. И.* Электрические машины. — Л.: Энергия, 1974.—839 с.

9. *Воскресенский А. П., Мазия Л. В., Сорокер Т. Г.* Основные принципы системы автоматического проектирования асинхронных двигателей. — Электротехника, 1978, № 9, с. 14—18.

10. *Гольдберг О. Д.* Качество и надежность асинхронных двигателей. — М.: Энергия, 1968.—176 с.

11. *Гольдберг О. Д.* Теоретическая и экспериментальная разработка методов расчета показателей надежности, ускоренных испытаний и контроля качества асинхронных двигателей, докторская диссертация. М., 1972.—355 с.

12. *Гольдберг О. Д.* Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения. — М.: Знание, 1976.—55 с.

13. *Готтер Г.* Нагревание и охлаждение электрических машин. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1961.—480 с.

14. *Гурин Я. С., Кузнецов Б. И.* Проектирование серий электрических машин. — М.: Энергия, 1978.—479 с.

15. *Гурин Я. С., Курочкин М. Н.* Проектирование машин постоянного тока. — М.; Госэнергоиздат, 1961.—351 с.

16. *Данилевич Я. Б., Кошарский Э. Г.* Добавочные потери в электрических машинах. — Л.: Госэнергоиздат, 1963.—214 с.

17. *Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М.* Основы проектирования электрических машин переменного тока. — Л.: Энергия, 1974.—503 с.

18. *Ермолин Н. П., Жерихин И. П.* Надежность электрических машин — Л.: Энергия, 1976.—247 с.

19. *Копылов И. П.* Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах. — М.: Высшая школа, 1980.—258 с.

20. *Костенко М. П., Пиотровский Л. М.* Электрические машины, ч. I. — М.; Энергия, 1972.—815 с. ч. II. — М.: Энергия, 1972.—712 с.

21. Проектирование электрических машин./ *Копылов И. П., Горяинов Ф. А., Клоков Б. К.* и др. — М.: Энергия, 1980.—495 с.

22. *Петров Г. Н.* Электрические машины, ч. II. Асинхронные и синхронные машины. — М.: Госэнергоиздат, 1963.—416 с.

23. *Петров Г. Н.* Электрические машины, ч. III. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. — М.: Энергия, 1968.—223 с.

24. *Постников И. М.* Проектирование электрических машин. — Киев, Гостехиздат, 1960.—910 с.

25. *Пунга Ф.* Проектирование электромашин. — Л.; Кубуч, 1934.—325 с.

26. *Рабинович И. Н., Шубов И. Г.* Проектирование электрических машин постоянного тока. — Л.: Энергия, 1967.—504 с.

27. *Скобелев В. Е.* Двигатели пульсирующего тока. — Л.; Энергия, 1968.—230 с.

28. *Сорокер Т. Г.* Расчет характеристик асинхронного двигателя. Бюллетень Всесоюзного электротехнического института, 1941, № 6, с. 27—32.

29. *Сорокер Т. Г.* Поверочный электрический расчет многофазного асинхронного двигателя. — Труды ВНИИЭМ, 1959, т. III, с. 112.

30. *Сорокер Т. Г., Каган Б. М.* О применении ЭВМ для расчетов серий электрических машин.—Вестник электропромышленности, 1958, № 9, с. 96—118.

31. *Сорокер Т. Г., Воскресенский А. П., Мордвинов Ю. В.* Применение ЦВМ для расчета и исследований асинхронных двигателей. Труды третьей научно-технической конференции. — М.: ВНИИЭМ, 1971, с. 131—144.

32. *Сорокер Т. Г., Мордвинов Ю. В.* Международная стандартизация низковольтных асинхронных двигателей по мощности и установочным размерам.— Электротехника, 1978, № 9, с. 7—9.

33. *Стрельбицкий Э. К.* Оптимальное проектирование асинхронных двигателей. — В кн.: Асинхронные двигатели, гл. 3/ Под ред. *В. М. Петрова* и *А. Э. Кравчика*. — М.: Энергия, 1980, с. 83—108.

34. *Стрельбицкий Э. К., Максимов Е. Н.* Оценка технического уровня асинхронных двигателей на стадии проектирования. — Электротехника, 1978, № 9, с. 12—14.

35. *Суйский П. А.* Исследование нагрева асинхронных короткозамкнутых двигателей серий А и АО мощностью от 0,6 до 100 кВт при продолжительном режиме работы. — Электричество, 1958, № 9, с. 35—37.

36. *Тихомиров П. М.* Расчет трансформаторов. — М.: Энергия, 1976.—544 с.

37. *Шуйский В. П.* Расчет электрических машин. — Л.: Энергия, 1968.— 731 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Оскар Давидович Гольдберг
Яков Семенович Гурин
Иван Семенович Свириденко

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Заведующая редакцией Н. И. Хрусталева. Редактор В. И. Петухова. Младший редактор Т. Ф. Артюхина. Художественный редактор В. И. Мешалкин. Художник Б. К. Мирошкин. Технический редактор Н. В. Яшукова. Корректор В. В. Кожуткина

ИБ № 3982

Изд. № СТД—376. Сдано в набор 13.09.83. Подписано в печать 26.11.84 Т-21188
Формат 60×90/16. Бум. тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Объем 27 усл. печ. л. 27 усл. кр.-отт. 32,93 уч.-изд. л.
Тираж 22000 экз. Зак. №3255 Цена 1 р. 40 к.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП—4, Неглинная ул., д. 29/14

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 113054, Москва, М-54, Валовая, 28